هندسة نقل الطاقة الكهربائية

Electrical Energy Transmission Engineering



الأستاذ الدكتور محمد توفيق الزهيري

الإصدار الأول

المؤلف في سطور



حاصل على شهادتي البكلوريوس والماجستير في الهندسة الكهربائية من كلية الهندسة / جامعة بغداد سنة 1967 و1975 على التوالي والدكتوراه من - جامعة برادفورد- بريطانيا سنة 1981. عمل مهندساً للمشاريع العسكرية في وزارة الدفاع العراقية للفترة من 1967 ولغاية 1976 صمم ونفذ خلالها مشاريع هندسية عديدة ثم عين تدريسيا في قسم الهندسة الكهربائية والالكترونية في الكلية الهندسية العسكرية العراقية عام 1976 حيث شغل منصب رئيس قسم الهندسة الكهربائية والألكترونية ونائب العميد في الكلية المذكورة للفترة من 1986 ولغاية 1991 ثم انتقل بعدها إلى كلية المنصور الجامعة حيث شغل منصب نائب العميد ورئيس قسم علوم الحاسبات ورئيس قسم بحوث العمليات 1991 – 1994.

أسس مكتب هيا استشاريون في بغداد - قطاع خاص – حيث عمل في مجال النفط والغاز ومحطات التوليد الكهربائية مع وزارتي النفط والكهرباء في العراق والجماهيرية الليبية للفترة من 1994 ولغاية 1999 ثم عين بعد ذلك تدريسياً ورئيساً لقسم الهندسة الالكترونية والإتصالات في جامعة النهرين للفترة من 2000 ولغاية 2007 عمل خلالها أيضاً استشاريا لعدة محطات لتوليد الكهرباء في العراق واستشارياً لمصافي النفط (مصفى الشمال ومصفى الوسط) وكذلك استشارياً للمنشأة العامة للمشاريع الصناعية ووزارة الكهرباء / مركز السيطرة الوطنية وشركة ابن رشد العامة لمشاريع المياه حيث صمم وأشرف على تنفيذ العديد من المشاريع الهندسية الكبرى الي بلغت اعدادها أكثر من 50 مشروعا استراتيجياً كذلك ساهم بتأسيس المجموعة الهندسية الاستشارية وفروعها الثلاثة في بغداد وعمان ودبي 2004 – 2009 . إنتقل سنة 2007 إلى الأردن حيث عمل أستاذاً في جامعة فيلادلفيا ولغاية 2020. كذلك عمل في عدة جامعات في العراق بصفة محاضراً خارجياً في جامعة بغداد والجامعة التكنولوجية للفترة من 1983 ولغاية 2000 . له 52 بحثا وتقرير بحث ومساهمات علمية في مؤتمرات دولية في مجال الهندسة الكهربائية والألكترونية منشورة في أميركا وبريطانيا وألمانيا والهند وكوريا وكندا وتونس وتركيا والمغرب والاردن والعراق وحاصل على عدة براءآت اختراع مسجلة في دائرة المخترعات البريطانية في لندن وفي ميونخ وطوكيو وبغداد. أشرف على أكثر من 40 رسالة ماجستير واطروحة دكتوراه. يعمل الآن أستشارياً وعضو شرف في جامعة جانديكار في الهند.

كتب أخرى مترجمة ومؤلفة للمؤلف:

1. التمديدات اكهربائية لأبنية والمنشآت – الطبعة الأولى/ رقم الإيداع في المكنبة الوطنية في عمان 1022 لسنة 2012
2. التمديدات اكهربائية للأبنية والمنشآت – الطبعة الثانية / رقم الإيداع في المكنبة الوطنية في عمان 2200 لسنة 2016
3. منظومات القدرة الكهربائية – الجزء الأول / رقم الايداع في المكتبة الوطنية ببغداد 143 لسنة 1984
4. منظومات القدرة الكهربائية – الجزء الثاني / رقم الايداع في المكتبة الوطنية ببغداد 144 لسنة 1984
5. التحليلات المصفوفية للمكائن الكهربائية / رقم الايداع في المكتبة الوطنية ببغداد 556 لسنة 1988
6. منظومات التأريض والحماية الكاثودية / رقم الايداع في المكتبة الوطنية ببغداد 243 لسنة 2001
7. المحطات الكهربائية الثانوية – التشغيل والصيانة / مطبعة الجيش العراقي 1971
8. وسائل الحماية الكهربائية للفولتية المتوسطة والمنخفضة / اصدار ألكتروني / لندن - 2022

كتب مؤلفة باللغة الإنجليزية

9. Power Electronics and Drives   Fist Edition – 2019

للإتصال بالمؤلف على الإيميل : drmohamadtofik@yahoo.com

هندسة نقل الطاقة الكهربائية

Electrical Energy Transmission Engineering

الأستاذ الدكتور محمد توفيق لازم الزهيري

Dr.Mohammed Tawfeeq Lazim Alzuhairi

Professor of Electrical and Electronics Engineering

بسم الله الرحمن الرحيم

[[سُبْحَانَكَ لا عِلْمَ لَنَا إِلا مَا عَلَّمْتَنَا إِنَّكَ أَنْتَ الْعَلِيمُ الْحَكِيمُ]]

المحتويات

الفصل الأول

المعلومات الفنية والأساسية والاصطلاحات لدراسة خطوط النقل

الفصل الثاني

نقل القدرة الكهربائية

الفصل الثالث

محاثة خط النقل

الفصل الرابع

متسعة خط النقل

الفصل الخامس

مكونات خطوط النقل العلوية المعلقة - العوازل والموصلات

الفصل السادس

أبراج خطوط النقل

الفصل السابع

محولات القدرة الكهربائية

الفصل الثامن

نقل الطاقة الكهربائية بواسطة الكيبلات المطمورة في الأرض

الفصل التاسع

حماية خطوط نقل القدرة الكهربائية – الأساسيات

الفصل العاشر

حماية خطوط النقل -الطرق والأساليب

الفصل الحادي عشر

حماية خطوط النقل -الطرق البديلة

الفصل الثاني عشر

حسابات الأعطال في خطوط النقل

ألملاحق والمراجع

تمهيد

بسم الله الرحمن الرحيم

تتفاخر الأمم بلغاتها القومية رغم قصور هذه اللغات في تحويل المصطلحات العلمية الحديثة إلى لغتتها فنجد مثلا أن اللغتين الصينية واليابانية هما أقصر اللغات في التعبير والكتابة لكننا نجدهم يترجمون العلوم الحديثة إلى لغاتهم ويدرسونها في جامعاتهم منذ القدم ويرسلون طلابهم للدراسة باللغات الأخرى المعروفة ليتعلموها وينقلون العلوم إلى بلادهم. وبالرغم من أن اللغة العربية لغة غنية وواسعة في مفرداتها فنحن العرب، نتفاخر في التدريس باللغة الأجنبية وهذا الشيء يعاب علينا جداً؛ فاللغة العربية لغة غنية وحية ومتطورة وهي أكثر لغات العالم عدداً في مفرداتها وقد شرفنا الله تعالى بها حيث نزل القرآن الكريم بلسان عربي مبين كونها لغة نقية وصافية ومقاطع الحروف فيها كثيرة. وصدق الشاعر حافظ إبراهيم من مصر العربية حين وصفها بأبياته الخالدة فقال:

وسـعتُ كتابَ اللهِ لفظاً وغايةً	وما ضِقتُ عن آيٍ به وعظاتِ
فكيفَ أضيق اليوم عن وصفِ	آلةٍ وتنسيقُ أسماءٍ لمختـرعاتِ
أنا البحرُ في أحشاءِهِ الدُرُ كامنٌ	فهل سألَ الغواصُ عن صدَفاتي

ومن خلال الأربعين سنة التي قضاها المؤلف في تدريس مواد الهندسة الكهربائية والإلكترونية في مختلف الجامعات العربية والأجنبية فقد بات مقتنعا تماماً أن الطالب الذي يدرس في غير لغته الأم يتخرج وهو ضعيف الفهم في المواد الهندسية البحتة وغير متعمق في إدراكها وهضمها. حيث أن أكثر الطلبة لا يقرأ الكتب المنهجية المقررة بغير لغته وانما يعتمد بصورة كلية على محاضرات المدرس ويحفظ جملة من المعادلات الرياضية العقيمة التي لا يعرف تفسيرها الهندسي ومكنونها الفيزيائي لكنه يعرف كيف يعوض فيها أرقاما ويستخرج نتائج صحيحة تؤدي به الى النجاح. أي أن الطالب لا يستوعب من المواد الهندسية التي يستفاد منها في حياته العملية إلا الجزء اليسير.

وحيث أنه من خلال مسيرة المؤلف في ترجمة وتأليف الكتب الهندسية باللغتين العربية والإنجليزية لم يجد صعوبة يوماً في إيجاد الكلمات العلمية والهندسية ومرادفاتها باللغتين، فلقد كان لمجامع اللغة في كل من بغداد والقاهرة ودمشق ومعاجم المصطلحات الفنية التي أصدرها الأخوة في بيروت الفضل الكبير في

ترجمة المصطلحات الإنجليزية العلمية للغة العربية بصورة وصفية وعلمية دقيقة. وفي ضوء ما ورد في أعلاه فقد آثر المؤلف أن يقوم بتأليف هذا الكتاب باللغة العربية ليسهل على القارئ الكريم فهمه كونه كتاب متخصص جداً في موضوع قلما تطرق اليه المؤلفون العرب وهو مادة هندسة نقل الطاقة الكهربائية. لقد روعي في تأليف وإعداد الكتاب سلامة اللغة العربية بقواعدها ومفرداتها ونصوصها الأصلية .

أخيراً بين يدي القارئ الكريم ثمرة جهد لا نزكيه، لكننا نجد الغبن في أن لا ننبه عليه ونسميه ، جعلنا الله من اللذين يستمعون القول فيتبعون أحسنه ، والله ولي التوفيق.

مقدمة الكتاب

بسمه تعالى

يعد موضوع نقل الطاقة الكهربائية من أماكن توليدها إلى أماكن استخدامها من المواضيع المهمة التي كانت ولا زالت التي تثير اهتمام المهندسين والباحثين في مجال الهندسة الكهربائية. وحيث أن التطورات التكنولوجية المذهلة التي حدثت في عصرنا الحالي ساهمة بصورة كبيرة على تجهيز الطاقة الكهربائية للمستهلكين بدرجة كبيرة من الأمان والوثوقية العالية والكلفة المناسبة اقتصادياً. والهدف من تأليف وإعداد هذا الكتاب هو التعريف بمجال هندسة نقل الطاقة الكهربائية من خلال إعطاء نظرة شاملة معاصرة وحديثة في هذا المجال الواسع وجعله دليلاً مفيداً ومرجعاً تعليمياً للدراسة. والمراد كذلك من هذا الكتاب إعطاء جوهر المعرفة لكثير من المواضيع الهندسية ذات الصلة بنقل الطاقة.

هذا الكتاب يقع في اثني عشر فصلاً كتب ملائمة لحاجة طلبة أقسام الهندسة الكهربائية في كليات الهندسة والمعاهد الفنية وكذلك المهندسين والفنيين الذين يعملون في مجال نقل وتوزيع الطاقة الكهربائية. وقد تم تقسيم المواد بين الفصول بعناية تامة من قبل المؤلف. وبقدر المستطاع فإن موضوعاً ما قد تم التطرق إليه في أحد الفصول بالتفصيل فقد وجدنا أنه لم تعد هناك حاجة للتطرق إليه مرة أخرى في فصلٍ آخر لتجنب التكرار.

واختصاراً لعرض ما يحتوي هذا الكتاب فإن الفصل الأول يزود القارئ بمقدمة عن المعلومات الفنية والأساسية والاصطلاحات والمفاهيم المهمة لدراسة خطوط نقل الطاقة الكهربائية وبعض النظريات التي تخص تحليل أداء الخطوط.

الفصل الثاني مخصص لدراسة خطوط النقل بصورة عامة والتعريف بمكوناتها وطرق تصنيفها وتمثيلها بدوائر رمزية، وكذلك حساب أداءها بالطرق الرياضية والبيانية في الحالة المستقرة وتحت الظروف الاعتيادية.

الفصلان الثالث والرابع يقدمان شرحا مفصلاً عن ثوابت ومعالم خط النقل التي تشمل محاثة ومتسعة الخط وكيفية حسابهما والطرق التقليدية المتبعة في هذا المضمار. هذه المعالم حسبت لخطوط ومنظومات قدرة ثلاثية الطور ومتوازنة على أساس الطور الواحد.

أما الفصل الخامس فيعطي شرحا وافيا لمكونات خطوط النقل العلوية المعلقة التي تعرف بالخطوط الهوائية وأنواع العوازل والموصلات المستخدمة في تكوينها.

ويعطي الفصل السادس عرضا موجزا لأنواع أبراج خطوط النقل وتصنيفها واستخداماتها وحسابات تدلي الأسلاك لمختلف المسارات.

كما يتطرق الفصل السابع إلى موضوع المحولات الكهربائية باعتبارها جزءً مهماً في منظومة نقل القدرة الكهربائية.

كذلك يغطي الفصل الثامن موضوعاً مهماً في مجال نقل الطاقة الكهربائية ألا وهو نقل الطاقة الكهربائية بواسطة الكيبلات المطمورة في الأرض حيث يقدم خلاصة بأنواع الكيبلات القديمة والحديثة المستخدمة في هذا المجال. وكذلك أنواع العوازل والموصلات المستخدمة وطرق التأريض فيها.

أما الفصل التاسع فقد تم تخصيصه لشرح أساسيات موضوع حماية خطوط نقل القدرة الكهربائية وموضوع الحماية بصورة عامة واستعراضاً لأنواع مرحلات الحماية وأنواع الأعطال في الخطوط وأسبابها. وللتعمق في موضوع الحماية يتطرق الفصلان العاشر والحادي عشر إلى طرق أساليب ووسائل حماية خطوط النقل الكهربائية على التعاقب.

وأخيراً يناقش الفصل الثاني عشر موضوع في غاية الأهمية وهو حسابات الأعطال في خطوط النقل بأنواعها المختلفة المتوازنة وغير المتوازنة وطرق حلها وتمثيلها والتعامل معها والمقارنة النظرية والعملية بين نتائجها.

ونود أن نبين للقارئ الكريم أن الكلمات والأحرف الأجنبية (الإنجليزية واللاتينية) والمعادلات الرياضية وأرقامها فقط تقرأ من اليسار إلى اليمين في عموم متن الكتاب.

محمد توفيق الزهيري
بريطانيا - لندن - 2023

الفصل الأول

المعلومات الفنية والأساسية والإصطلاحات لدراسة خطوط النقل

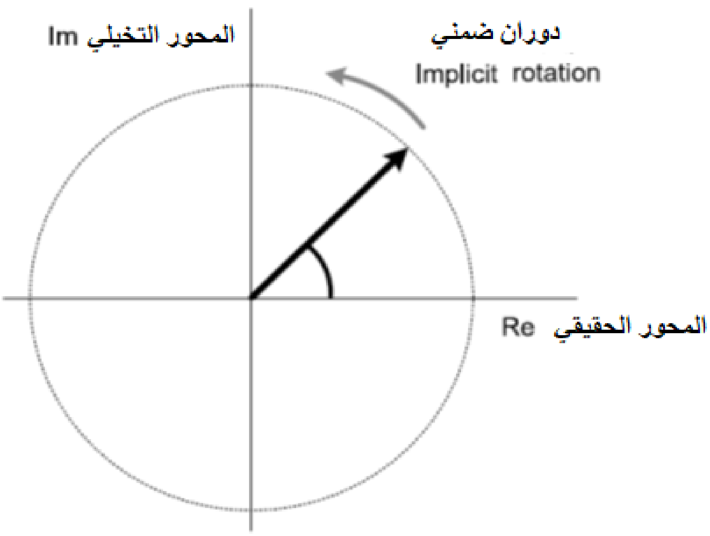
1-1 مقدمة

في هذا الكتاب تبدأ دراسة هندسة نقل الطاقة الكهربائية في الفصل الثاني التالي، لكننا ننصح القارئ أن لايتخطى قراءة هذا الفصل المهم لكي يتابع بانتظام مراحل شرح وفهم المواد التي سترد بالتتابع في الفصول التالية.

بالإضافة إلى المعلومات الأساسية للدوائر الكهربائية الخاصة بالتيار المتناوب والمعلومات الأساسية لأنظمة القدرة الكهربائية فان العاملين في مجال هندسة نقل الطاقة الكهربائية يجب أن تكون لديهم القدرة على التعامل مع الكميات الإتجاهية والمطاورات ونظرية الشبكات ذات المنفذين وجبر المصفوفات وتطبيق نظرية العالم كلارك في تمثيل الأنظمة غير المتوازنة بواسطة المركبات المتماثلة؛ وكذلك فهم الاتجاهات والقطبية والمركبات الأساسية التي تحتوي على معلومات هامة للتيار والفولتية الاتجاهية فى ظروف الأعطال وهذه الأدوات المهنية تستخدم فى التطبيقات والتحاليل واختبارات خطوط النقل بمختلف أنواعها.

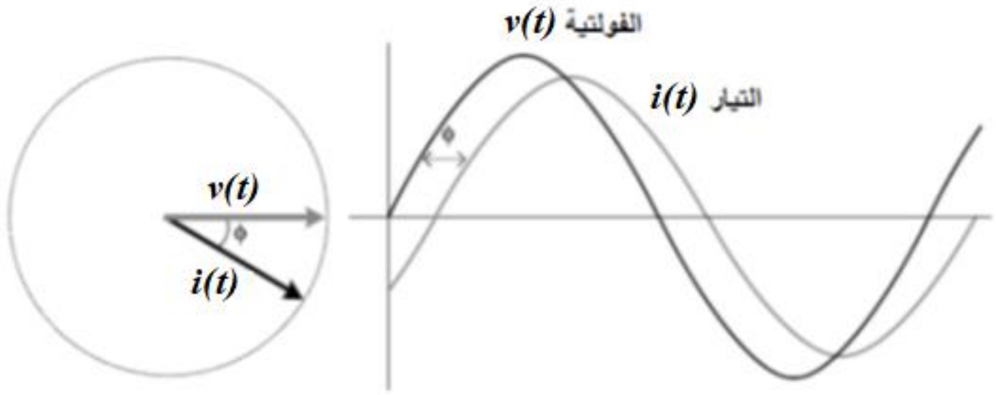
2-1 المتجهات والمطاورات Vectors and Phasors

المتجه هو عدد مركب يستخدم لتمثيل الكميات التي تكون قيمها ثابتة مع الزمن ولكن لديها مقدار وزاوية محددين. أما المطاور فهو عدد مركب يستخدم لتمثيل الكميات التي تتغيرمع الزمن بشكل منحنى جيبي لكن لها أيضا مقدار وزاوية كما هو المتجه نفسه، أنظر الشكل 1-1.



الشكل 1-1 المطاور A Phasor.

وبعبارة أخرى أن كل مطاور هو متجه ولكن ليس كل متجه هو مطاور، فالفولتية v والتيار i في حالة التيار المتناوب واللذان يتغيران مع الزمن بصيغة موجة جيبية هما مطاوران ، أنظر الشكل 1-2 . أما الممانعة Z التي تمثل حاصل الجمع الإتجاهي للمقاومة R والمفاعلة X فهي متجه وليست مطاور لأنها ثابتة المقدار والزاوية ولا تتغير مع الزمن. وفى نظم نقل الطاقة تستخدم المتجهات والمطاورات في تمثيل الخطوط وعمل التحليل الكامل لأدائها. والمخطط الإتجاهي Vector diagram يجب أن تصاحبه الدائرة التي يمثلها إلا إذا كانت الدائرة واضحة تماماً. والمخطط الطوري Phasor diagram يوضح كل من القيمة والزوايا النسبية لكل الفولتيات والتيارات، بينما الدائرة توضح فقط أماكن واتجاه وقطبية الفولتيات والتيارات، وهذا الفرق يجب أن يكون واضحاً لأنه في أغلب الأحيان يحدث خلط أو لبس حينما يدمج الرسم الإتجاهي ورسم الدائرة أو يتم حذف رسم الدائرة تماماً.



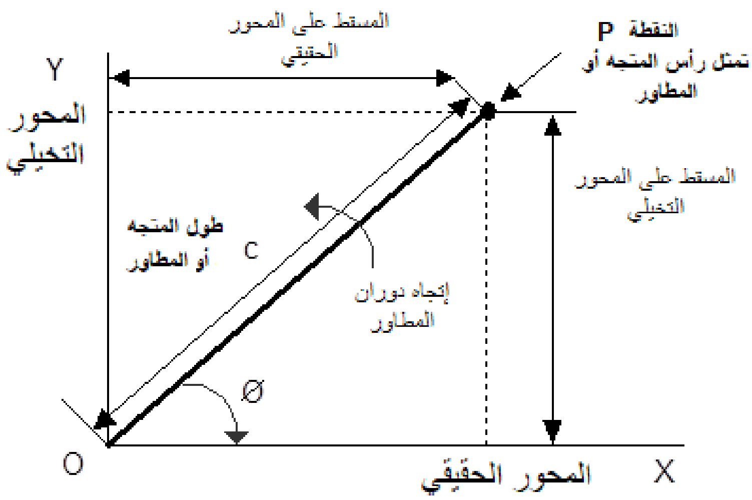
الشكل1-2 تمثيل الفولتية والتيار بمطاورين، التيار يتأخر عن الفولتية بزاوية محددة.

رموز المطاورات

فى البداية يجب أن تنسب جميع المطاورات إلى محورمرجع ثابت. وأكثر أنواع المحاور شيوعاً يتكون من محور الكميات الحقيقية (x) ومحور الكميات التخيلية (y) كما هو مبين بالشكل1-3. وهذان المحوران ثابتان في المستوي بينما تتحرك المطاورات لأنها تمثل دوال جيبية (إتجاه الدوران الموجب هو عكس اتجاه دوران عقارب الساعة) وعلى هذا يكون وضع المطاور مختلفا عند أية لحظة زمنية. وطول المطاور يتناسب مع أعظم قيمة له، ومسقطا هذا المطاور على المحورين الحقيقي والتخيلي يمثلان المركبتان الحقيقية والتخيلية عند تلك اللحظة.

ويمكن أن يمثّل المطاور بالقيمة الفعالة rms value والتي يتم إستخدامها في الغالب، كما يمكن تمثيل النقطة (P) فى الشكل 1-3 بالصيغ التالية:

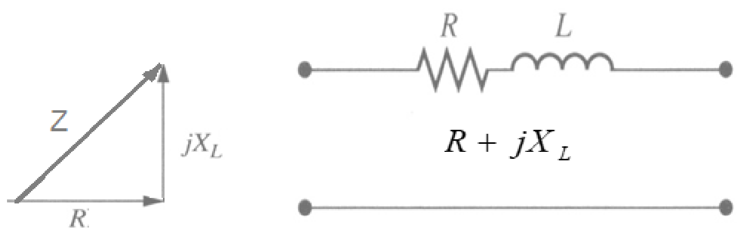
- الصيغة الاتجاهية أو الطورية Phasor form
- الصيغة القطبية Polar form
- الصيغة المركبة Complex form
- الصيغة الآسية Exponential form



الشكل 1-3: المحاور الثابتة وتسمية الاتجاهات أو المطاورات.

- المخطط الاتجاهي Vector diagram

ترسم المتجهات إنطلاقاً من نقطة الأصل كما هو مبين فى الشكل 1-4 الذي يبين الرسم الأتجاهي لممانعة تتكون من مقاومة ومفاعلة حثية مربوطتان على التوالي.



(المخطط الإتجاهي) (الدائرة)

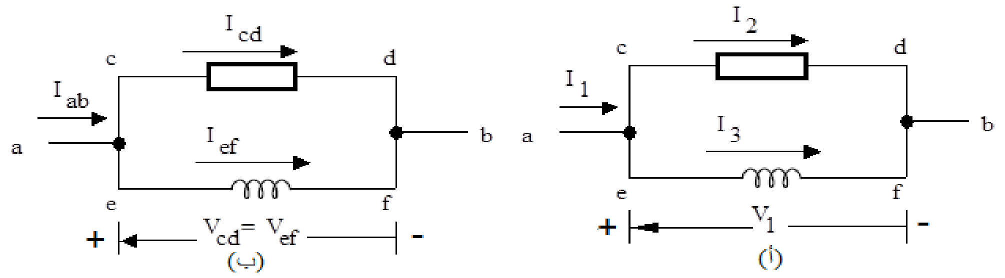
الشكل 1-4 رسم اتجاهي للعناصر الأساسية (مقاومة – مفاعلة) تم توصيلهما على التوالى ومحصلتهما الممانعة Z.

3-1 الإصطلاحات

للإصطلاحات أهمية كبرى في دراسة خطوط النقل خاصة فيما يتعلق بتحليلاتها الرياضية جميعها لذلك سوف يتم إستخدام الإصطلاحات القياسية الواردة في معظم مراجع وكتب الهندسة الكهربائية وهندسة القوى بصورة خاصة في هذا الكتاب.

1- الرموز الخاصة لرسم التيار في الدائرة

يمثل الإتجاه الموجب لكل من التيار والفيض (أو القوة الدافعة المغناطيسية) بطريقتين: الأولى هي تمثيل التيار بسهم موحد الاتجاه على الدائرة الكهربائية، الشكل 1-5 (أ). والطريقة الثانية يتم فيها تمثيل التيار برموز ثنائية سفلية تعبر عن الطرف الذي يبدأ التيار بالحركة منه إلى الطرف الذي ينتهي إليه (مثال I_{ab})، الشكل 1-5 (ب).



الشكل 1-5.

2- الرموز الخاصة بالفولتية المتناوبة

يتم تمثيل قطبية الفولتية المتناوبة بطريقتين أحدهما هي إضافة علامة (+) عند نهاية السهم الممثل للفولتية والتي تعبر عن النقطة الأعلى جهداً، والطريقة الثانية استخدام رموز سفلية مثلاً: (V_{ab}) تعبر عن الفولتية بين نقطتين a و b حيث تكون a أعلى جهداً من b والرموز التى يتم استخدامها كالآتي :

- الرمز (V) يستخدم للتعبير عن الفولتية، وسيتم استخدامه للتعبير عن فرق جهد، ويستخدم الحرف (E) لتمثيل فولتية المولد. كما يستخدم الرمز U في بعض الدول.
- استخدام (+) عند نهاية السهم على الدائرة الكهربائية يعبر عن الطرف الذي تكون فولتيته موجبة بالنسبة للطرف الآخر فى نصف الدورة الواحدة.
- فى طريقة إستخدام الرموز السفلية للتيار أو الفولتية فتعبر هذه عن الإتجاه الحقيقي أو المفترض للانخفاض في الفولتية عندما تكون فى نصف الدورة الموجب. ومثال على الفولتية أو فرق الجهد بين الطرفين a و b يمكن كتابته E_{ab} أو V_{ab} أي أن الفولتية

تكون موجبة فى حالة أن يكون جهد الطرف (a) أعلى من جهد الطرف (b) في نصف الموجة المتناوبة الموجب، وينعكس الوضع خلال نصفها السالب.

- تستخدم الأحرف الطباعية الصغيرة v و i للقيم اللحظية للفولتية والتيار الطرفيين وهي تلك الكميات التي تتغير بشكل جيبي أو لحظي مع الزمن وذلك عندما يتعلق الأمر بالطبيعة الطورية لهذه القيم. وتستخدم الحروف الطباعية الكبيرة نوع (V) للدلالة على كمية ج. م . ت (جذر متوسط التربيع rms value) أو الكميات الثابتة (كميات التيار المستمر.d.c)، وتشير رموز الحروف الطباعية المائلة (V) أو$|V|$ أيضاً إلى قيمة ج. م. ت، لكن عندما يتعلق الأمر بالمقدار (وليس بالطور) فان قيمة الذروة أوالاتساع لكمية متناوبة تكون $V\sqrt{2}$. ومع أن هناك كميات مركبة مثل الممانعة Z وثوابت خط النقل D,C,B,A لا تتغير مع الزمن (كميات غير طورية) إلا أنه يرمز لها بالحروف الطباعية الكبيرة (الغامقة) وذلك عندما يستوجب إستخدام كمياتها المركبة بدلاً من مقاديرها. وعندما تكتب بالحروف الطباعية المائلة (Z) فإن المقدار وحده يكون هو المطلوب، وبما أن هناك كميات أخرى مثل المحاثة L والمتسعة C والمقاومة R والمفاعلة X تكون غير مركبة سنرمز لها بالحروف المائلة في كل الاحوال.

3- يؤخذ الإتجاه الموجب لدوران الكميات الطورية (تعريف عالمي) ليكون عكس إتجاه عقرب الساعة، وذلك لأن هذا الإتجاه هو إتجاه قياس الزوايا الموجبة. ودوران الأطوار أو تتابع الأطوار هو الترتيب الذي يطلق على مطاورات متتابعة عندما تصل لأقصى قيمة موجبة؛ وتتابع الأطوار هو الترتيب الذي تمر فيه الأطواربنقطة ثابتة. ففي الأنظمة ثلاثية الطور يكون تتابع الأطوار موجباً إذا كان التتابع a b c وإلا كان التتابع سالباً إذا كان مثلاً b c a .

4-1 الوحدات Units

في هذا الكتاب أستخدمت الوحدات القياسية الدولية (SI Units) وبالتخصيص: المتر والكيلوغرام والثانية، والوحدات الكهربائية المعروفة: أمبير، فولت، أوم، هنري، فاراد، سوية مع وحدات القدرة: الواط ووحدات الطاقة الجول ووحدات القوة النيوتن. وحيث أن هذه تمثل مجموعة متآلفة من الوحدات فانها لاتتطلب إستخدام ثوابت أو معاملات تحويل فيما بينها.

5-1 نظام نسبة الوحدة THE PER-UNIT SYSTEM

تعرف قيمة نسبة الوحدة لأية كمية بأنها النسبة لتلك الكمية الى قيمة كيفية يتم أختيارها بحيث تمتلك الأبعاد نفسها وتدعى بالقيمة الأساس. لذا فأن قيمة نسبة الوحدة تكون بلا أبعاد. ويشار الى القيم الأساس بالرمز السفلي b وقيم نسبة الوحدة بالرمز السفلي pu.

إذا تم تغذية مصدر أحادي الطور فولتيته V تياراً مقداره I أمبير إلى حمل ممانعته Z أوم واختيرت V_b فولت بوصفها الفولتية الاساس، فأن قيمة نسبة الوحدة لفولتية المصدرتكون $V_{pu} = V/V_b$. وبالأسلوب نفسه قد يتم تمثيل تيار المصدر بنظام نسبة الوحدة بكونه $I_{pu} = I/I_b$. وعليه تكون هناك ممانعة أساس $Z_b = V_b/I_b$ أوم. وبتطبيق نظام نسبة الوحدة على الممانعة ،

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b} = \frac{V/I}{V_b/I_b} = \frac{V/V_b}{I/I_b} = \frac{V_{pu}}{I_{pu}} \qquad (1.1)$$

عليه فأن قيمة نسبة الوحدة تخضع لقانون أوم (لذلك تخضع أيضاً لقوانين الشبكات الأخرى جميعها).

إن قيمة 1.0 بنسبة الوحدة لأية كمية تساوي القيمة الأساس لتلك الكمية. وعليه تكون قيم نسبة الوحدة منسوبة الى الرقم واحد (1). وعند ضرب قيم نسبة الوحدة بالعدد 100 فسوف تعطى القيم بالنسبة المنوية (%) والتي تكون منسوبة الى العدد 100 بدل الرقم واحد. ونستطيع هنا أن نبين أن قانون أوم لايصح تطبيقه في نظام النسبة المئوية للوحدات. لهذا السبب فان أية بيانات معطاة لمنظومة قوى بنظام النسبة المئوية من المستحسن تحويلها إلى نظام نسبة الوحدة قبل الشروع بعمل أية حسابات لازمة.

وتجدر الإشارة إلى أن أختيار قيم الأساس يكون كيفياً ويكون ملائم بحيث لا يؤثر على النتائج النهائية لأية مسألة معينة. وبما أن $Z_b = V_b/I_b$ أوم فإن إثنتان من هذه القيم الثلاث فقط يمكن إختيارها كيفياً، بموجب ذلك فإن الإختيار يثبت قيمة الفولت- أمبير الأساس التي تساوي $S_b = V_b I_b$ (عليه يتم تثبيت القدرة والقدرة المتفاعلة أيضاً بموجبها). وقيمة الفولت ـ أمبير هذه يمكن معالجتها فنياً بنظام نسبة الوحدة حيث أن:

$$S_{pu} = \frac{S}{S_b} = \frac{VI^*}{V_b I_b} = V_{pu} I_{pu}^* \qquad (1.2)$$

حيث I^* هو مترافق التيار .

يمكن تمثيل الكميات V, I, Z, S الأصلية بأعداد مركبة لها زوايا طور، ومن المفروض بنظام نسبة الوحدة أن يتم الحفاظ على زوايا الطور هذه. عليه فأنه من الضروري الفهم بأن جميع قيم الأساس المختارة تكون كميات قياسية، أي ليست لها زوايا طور لذلك فأن زاوية الطور لكمية ممثلة بنظام نسبة الوحدة هي زاوية طور الكمية الأصلية. ويخضع نظام نسبة الوحدة لقواعد الـجبر الـمركـب، فـاذا كـانت مثلاً قيمة ممانعة دائرة توالي بالأوم هي:

$Z = R \pm j\,X$ ، فأن نفس الممانعة بنسبة الوحدة بالأوم تكون:

$$Z_{pu} = R_{pu} \pm j\,X_{pu}$$ ،

وبالمثل إذا كانت المسامحة لدائرة توازي مكافئة بالمهو (عكس وحدة الأوم) هي:

$Y = G \pm j\,B$ فأن المسامحة بنسبة الوحدة هي: $Y_{pu} = G_{pu} \pm jB_{pu}$ ، وكذلك فإن:

$$Y_b = \frac{I}{Z_{pu}} \quad \text{و} \quad Y_b = \frac{Y}{Y_{pu}}$$

ليس هناك شيء يدعو للغرابة حول إستخدام نظام نسبة الوحدة بالنسبة للشخص الذي يستخدمه للمرة الأولى، حيث أنه يُستخدم بكثرة في مجال الهندسة الكهربائية لكونه يجعل بيانات عددية معينة لها معنى أكثرمن أي نظام آخر. فإذا كان التيار المعطى في دائرة ما 60 أمبيرفأن هذه المعلومة ليست كافية بذاتها مالم يعطى التيار المقنن (المقرر) للدائرة أيضاً. عندئذ يمكننا أن نعرف فيما إذا كانت الدائرة محملة بحمل خفيف أو بحمل مفرط. فإذا كان التيار المقنن للدائرة هو 80 أمبير عليه تكون الدائرة محملة بـ $\frac{3}{4}$ حملها المقنن ويكون التيار 75% بالنسبة المئوية أو 0.75 بنسبة الوحدة من التيار المقنن. وبالأسلوب نفسه فأن طالب الهندسة الكهربائية معتاد أن يمثل الكفاءة بوصفها قيمة بالنسبة المئوية وعامل القدرة بوصفه قيمة بنسبة الوحدة. كذلك يعطى الأنزلاق Slip في المحركات الحثية أما بالنسبة المئوية اوبنسبة الوحدة . لكن تجدر الإشارة إلى أن قيمة التيار معبراً عنها بنظام نسبة الوحدة تكون لا معنى لها إلا إذا أعطيت قيمة التيار الأساس أيضاً. ويعرف التيار المقنن (الحراري) لأية دائرة بوصفه ذلك التيار الذي يمكن للدائرة حمله بصورة مستمرة بدون تجاوزحدود الحرارة المخصصة طبقاً للمواصفات القياسية البريطانية (BSS) أو الدولية (IEC) .

إن العلاقات الرياضية التي تكون صحيحة لنظام وحدات إعتيادي تكون أيضا صحيحة في نظام نسبة الوحدة. مثال على ذلك خذ دائرة لها ممانعة كلية Z_t متكونة من عدة ممانعات... Z_1, Z_2 مربوطة على التوالي، لذا تكون $Z_t = Z_1 + Z_2 + \cdots$. وبالقسمة على Z_b ينتج تحويل المعادلة إلى نظام نسبة الوحدة بينما تبقى المعادلةعلى صحتها؛ أي أن:

$$Z_{t.pu} = Z_{1.pu} + Z_{2.pu}..$$

من الواضح أن العبارة المذكورة في أعلاه يجب أن تسوَغ بإضافة عبارة " شريطة أن تستعمل قيمة أساس (عامة) واحدة فقط لكل حدود المعادلة ". وهذا الشرط قد يصبح أوضح وذلك بتعويض $Z_b = V_b/I_b$ حيث ينتج عن ذلك:

$$\mathrm{I}_b Z_t/V_b = I_b Z_1/V_b + I_b Z_2/V_b + \cdots \qquad (1.3)$$

وهذه المعادلة تبين أن الممانعات المعبرعنها بالأوم يجب أن تعطى بمستوى الفولتية الأساس المشترك وهو V_b ، وكذلك يجب أستعمال تيار أساس مشترك وهو I_b أيضاً.

بصورة عامة، تكون للمكونات الأساسية لأي محطة أومشروع في منظومة قدرة فولتيات وتيارات مقننة مختلفة، عليه عند إستخدام نظام نسبة الوحدة فانه من الضروري تحويلها إلى قيمة مشتركة (أو قيمة أساس واحدة) للتيار وكذلك الفولتية، في هذه الحالة يجب إستخدام قيمة أساس عوضاً عن القيمة المقننة. عليه فمن المعادلة (1.3) تكون العلاقة التي تربط القيمة الأومية للممانعة Z إلى قيمتها بنسبة الوحدة Z_{pu} كما يأتي:

$$Z_{pu} = \frac{I_b Z}{V_b} \qquad (1.4)$$

على هذا الأساس فإن الممانعة مقدرة بنسبة الوحدة لمعدات ذات قدرة MVA معينة، أي أن هناك تيار معين عند فولتية مقننة معينة، تكون قيمة الكسر الناتج عن قسمة فولتية ممانعة للطور الواحد على فولتية الطور المقننة الطبيعية عند مرور ذلك التيار.

مثال محلول 1-1

ممانعتان مقدارهما 2 j +1 و 2j +2 أوم مربوطتان على التوالي عبر مصدر فولتية 250 فولت. احسب الممانعة الكلية وتيار الحمل باستخدام نظام نسبة الوحدة.

الحل:

إختر (بصورة كيفية) فولتية أساس مقدارها 200 فولت وتيار أساس مقداره 20 أمبير.

مقد ار الممانعة بنسبة الوحدة يكون:

200/20 =10 Ω

عليه فإن

الممانعة الأولى بنسبة الوحدة :
$$Z_{1.pu} = \frac{1 + j2}{10} = 0.1 + j0.2\ p.u.$$

الممانعة الثانية بنسبة الوحدة :
$$Z_{2.pu} = \frac{2 + j2}{10} = 0.2 + j0.2\ p.u.$$

الممانعة الكلية بنسبة الوحدة :
$$Z_{t.pu} = 0.3 + j0.4 = 0.5\ \angle 53.14^{\circ} p.u.$$

$$V_{pu} = \frac{250}{200}\ \angle 0^{\circ}\ = 1.25\angle\ 0^{\circ}$$

$$I_{pu} = (1.25\ \angle 0^{\circ}\ )/\ (0.5\angle 53.14^{\circ}) = 2.5\angle - 53.14^{\circ}\ p.u.$$

التيار الحقيقي سيكون

$$I\ = 2.5 \times 20\ = 50\ A$$

إن فولتية الممانعة (IZ) / طور لماكنة ما تعرف بانها حاصل ضرب تيارها المقنن بالأمبير في ممانعتها بالأوم / طور. فاذا تم تقسيم فولتية الممانعة المعطاة بالفولت / طور على فولتية الطور المقننة فستكون النتيجة قيمة الممانعة بنسبة الوحدة، وهذا يمكن بيانه من المعادلة (1.4). لذلك فإذا كان للمولد ممانعة (تزامنية) مقدارها 200% أو 2 بنسبة الوحدة، عليه فعند تيار الحمل الكلي تكون فولتية الممانعة IZ_S ضعف قيمة فولتية الطور المقننة.

النقطة التي غالباً ما تسبب الإرباك هي فيما إذا كانت ممانعة الماكنة مقدرة بنسبة الوحدة تشير إلى تيارها المقنن أوإلى أية قيمة كيفية اختيرت أساساً للتيار، والإثنان يمكن استعمالهما لكن الذي يعطى هو الذي يستعمل، وإذا لم يعط أحدهما فانه من المعتاد استخدام التيار المقنن باعتبار ان هذه الكمية هى الكمية المعروفة دائماً.

ومن فوائد استخدام نظام نسبة الوحدة إنه لو أخذ نوع معين من أنواع المكائن كأن يكون مولداً تزامنياً (Alternator) ذو قطبين غير بارزين فإن ممانعته بالأوم لكل طور تتغير ضمن مدى واسع يعتمد على تقنينه . لكن عندما يعبر عن هذه الممانعة بنظام نسبة الوحدة مسندة إلى تقنينها الحراري فانها ستتغير على مدى أصغر بكثير وعليه تكون غالباً قيمة ثابتة (قياسية) .

كذلك يمكن تطبيق نظام نسبة الوحدة على الدوائر الثلاثية الطور. والطريقة الأكثر بساطة للدوائر الثلاثية الطور المتوازنة هي أن نستعمل القيم على أساس الربط النجمي لهذه الدوائر بحيث تؤخذ القيم لكل طور (خط الى محايد (الخط الحيادي)) للكميات الأصلية جميعا والكميات الأساس. أي أنه عند التعامل مع الدوائر المتوازنة ثلاثية الطور فانه من الشائع الإفتراض أن هذه الدوائر تكون مربوطة على شكل نجمي، إلا إذا ذكر خلاف ذلك. أي أن الممانعات تأخذ تياراً عند فولتية خط إلى محايد.

إن قيمة نسبة الوحدة لفولتية خط إلى خط تساوي قيمة نسبة الوحدة لفولتية الخط الى المحايد. وقيمة الفولت ـ أمبير للأطوار الثلاثة المعبر عنها بنسبة الوحدة تساوي قيمة الفولت ـ أمبير بنسبة الوحدة للطور الواحد على شرط أن تشكل قيم الأساس دائما منظومة ثلاثية الطور ومتوازنة. هذا يعنى كون فولتية الخط الأساس تساوي $\sqrt{3}$ × فولتية الطور الأساس. وبنظام نسبة الوحدة فان الفولت ـ أمبير (فيما إذا كانت للاطوار الثلاثة أو لطور واحد) تساوي حاصل ضرب الفولتية (فيما إذا كانت خط إلى خط أوخط إلى طور) مع التيار وعليه سوف لا تكون هناك معاملات تظهر في الحسابات مثل 3 و $\sqrt{3}$ إطلاقاً.

ويعتبر نظام نسبة الوحدة نظام وحدات منسجم كلياً ويكون وافياً للتطبيق لجميع صيغ الدوائرالكهربائية الإعتيادية، عليه فإذا ما تم اختياركميات بصورة كيفية (فقط لتكون أساساً) فان جميع الكميات الأساس الأخرى يمكن اشتقاقها من هاتين الكميتين المعينتين. وقد تكون هاتان الكميتان هما قدرة الأطوار الثلاثة مقدرة بالميكافولت أمبير MVA وفولتية الخط مقدرة بالكيلو فولت kV (حيث انهماغالبا ما تعطيان على لوحة التسمية لأي ماكنة أو جهاز كهربائي) ، لكن الكميات الأساس يتم اختيارها لتكون القيم الطورية لها ، أو قد تأخذ القدرة للأطوار الثلاثة MVA مع فولتية الطور فقط .عليه فاذا أخذت القيم الأساس للأطار الثلاثة مثلاً 100 MVA عند فولتية خط 132kV، فان فولتية الطور بالكيلو فولت لكل طور بنسبة الوحدة تكون :

$$132/\sqrt{3} = 76.21 \text{ كيلوفولت / طور}$$

ويكون التيار بنسبة الوحدة :

$$100/(\sqrt{3} \times 132) = 0.4373 \text{ كيلوأمبير}$$

وتكون الممانعة للطور بنسبة الوحدة

$$76.21/0.4373 = 174.3 \text{ أوم / طور}$$

يمكن إعادة كتابة المعادلة (1.4) كالآتي:

$$Z_{pu} = \frac{I_b Z}{V_b} = \frac{(3V_b I_b \times 10^{-6})Z}{(\sqrt{3}V_b \times 10^{-3})^2}$$

$$= \frac{(\text{الأساس للأطوار الثلاثة}MVA\ )}{\text{فولتيةالخط}(\text{kV}\ )\ ^2} \qquad (1.5\ )$$

هذه الصيغة تربط الممانعة الأومية إلى قيمتها بنسبة الوحدة بدلالة قيمتي الأساس الاعتياديتين. فمثلاً لمولد له ممانعة أومية ثابتة معينة، فأنه ينتج من تطبيق المعادلة (1.5) أعلاه أن:

$$Z_{pu} \propto \frac{\text{الـ } MVA \text{ الاساس للأطوار الثلاثة}}{\left(\text{فولتية الخط } kV \text{ الأساس}\right)^2} \qquad (1.6\ )$$

عليه فإذا ما أعطيت ممانعة الماكنة بنظام نسبة الوحدة نسبة إلى تقنينها الحراري فإنه من الممكن تحويلها إلى أية قيمة أساس باستخدام العلاقات المذكورة في أعلاه.

مثال محلول 1- 2

مولد ثلاثي الطور تقنينه 50 MVA و 12.8kV له مفاعلة طور (تزامنية) مقدارها 2.0 p.u. على تقنينها الحراري. يجهزخطاً علوياً معلقاً طوله 5 كيلومترات وكل طور منه له ممانعة مقدارها 0.22+j0.51 أوم لكل كيلومتر . احسب الممانعة الكلية على أساس قدرة مقدارها 100MVA (للاطوار الثلاثة) وفولتية أساس 11kV.

الحل :

$$\text{التيار الأساس} = \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 11000} = 5260\ A$$

$$\text{ممانعة الخط بنظام نسبة الوحدة} = \frac{5260 \times 5 \times (0.22 + j\ 0.51)}{11\ 000/\sqrt{3}}$$

$$= 0.91 + j\ 2.11\ p.u.$$

ومن المعادلة (1.4) تكون مفاعلة المولد

$$= j\frac{12800}{\sqrt{3}} \times 2.0/\left(\frac{50 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 12800}\right) = j\ 12800^2 \times 4 \times 10^{-8}\Omega$$

ومفاعلة المولد بنسبة الوحدة عند 100MVA و 11kVهي

$$= j\frac{12800^2 \times 4 \times 10^{-8} \times 5260}{11000/\sqrt{3}} = j\ 5.42\ p.u.$$

والممانعة الكلية عند 100MVA و11kV تكون بنسبة الوحدة :

0.91 + j 7.53 p.u.

إن الفائدة الرئيسية من استخدام طريقة نسبة الوحدة في تحليل منظومة قدرة تظهر عندما تحتوي المنظومة على محولات. وقد يتضمن التحليل هذا باستخدام الممانعات الأومية عن نقل الممانعات خلال المحولات باستعمال مربع نسة ـ اللفات حتى تكون جميع الممانعات منسوبة إلى مستوى مشترك في الفولتية عندما يتم حساب التيار في ذلك المستوى (لأية ظروف معينة) فان ذلك التيار يجب عندها نقله خلال المحولات باستخدام معكوس نسبة اللفات وذلك لايجاد التيار عند أي مستوى آخر من الفولتية.

الآن سوف نبين أن قيمة الممانعة محسوبة بنسبة الوحدة تكون متساوية على جهتى محول ذي ملفين، وبالتشابه تكون قيمة التيار بنسبة الوحدة متساوية أيضاً على جهتي المحول نفسه شريطة أن تكون القيم الأساس على جهتي المحول منسوبة بصورة ملائمة إلى عمله. فإذا أشرنا بالرمز السفلي p إلى جهة الابتدائي والرمز السفلي s إلى جهة الثانوي عليه فإذا أعطيت V_{bp} و I_{bp} بوصفها قيم أساس على جهة الابتدائي عندئذ تكون القيم الأساس على جهة الثانوي (أفرض للسهولة محولاً أحادي الطور) كالاتي:

$$\begin{cases} V_{bs} = V_{bp} \times (N_s/N_p) \\ I_{bs} = I_{bp} \times (N_s/N_p) \end{cases} \qquad (1.7)$$

وإذا كانت Z_p هي الممانعة الأومية لملف الابتدائي فان قيمتها بنظام نسية الوحدة تكون:

$$\mathrm{Z}_{p.pu} = I_b Z_p / V_{bp},$$

وبالاسلوب نفسه فان

$$Z_{s.pu} = I_{bs} Z_s / V_{bs},$$

وعندما تنسب ممانعة الثانوي إلى الملف الابتدائي فستكون الممانعة الكلية للمحول

$Z_p + Z_s(N_p/N_s)^2$ أوم.

وان الممانعة بنسبة الوحدة للمحول كله على جهة الابتدائي تكون.

$$= \frac{I_{bp}}{V_{bp}} (Z_p + Z_s (N_p/N_s)^2)\ p.u.$$

$$= \frac{I_{bp}}{V_{bp}} Z_p + I_{bp} \frac{N_p}{N_s} \times \frac{N_p}{N_s N_{bp}} \times Z_s\ p.u.$$

$$= \frac{I_{bp} Z_p}{V_{bp}} + \frac{I_{bs} Z_s}{V_{bs}} p.u. = Z_{p.pu} + Z_{s.pu} p.u.$$

عليه فإن الممانعة الكلية للمحول بنسبة الوحدة محسوبة لأي أساس من الفولتية والـ MVA تكون حاصل جمع ممانعتي ملفي الابتدائي والثانوي والتي تكون قيمها محسوبة بنسبة الوحدة متساوية على جهتي المحول . من الواضح أن ممانعة أي جهاز مربوط إلى الابتدائي وله الفولتية نفسها ستكون ضمنياً مع Z_p . وممانعة أي جهاز مربوط إلى الثانوي ستكون ضمنياً أيضا مع Z_s. ولاضير في أن تكون القيم الأساس معبراً عنها بالفولت - أمبير وبالفولت. حيث أنه من الواضح أن الفولت - أمبير الأساس هي نفسها على جهتي المحول ذو الملفين.

إن التحليلات أعلاه تطبق على محول أحادي الطورأولمحول ثلاثي الطوربشكل مربوط نجمي / نجمي حيث تشير الاصطلاحات إلى القيم لكل طور نجمي (خط الى محايد). وسوف نبين الآن أن قيمة ممانعة الطور بنظام نسبة الوحدة هي نفسها إذا كان الربط نجميا أومثلثياً.

تأمل ملف مثلثي له ممانعة مقدرها Z أوم / طور مربوطة إلى مصدر ثلاثي الطورله فولتية خط أساس مقدارها V_{bL} تقابل فولتية طورأساس $V_b = V_{bL}/\sqrt{3}$.

والتيارالأساس في أحد الأطوارمن الملف هو I_b وهذا يقابل تيارخط أساس $I_{bL} = \sqrt{3} I_b$ وكذلك

$$Z_{pu.delat} = \frac{I_b Z}{V_{bL}}$$

الممانعة المكافئة النجمية تكون Z/3 أوم وقيمتها بنسبة الوحدة تكون

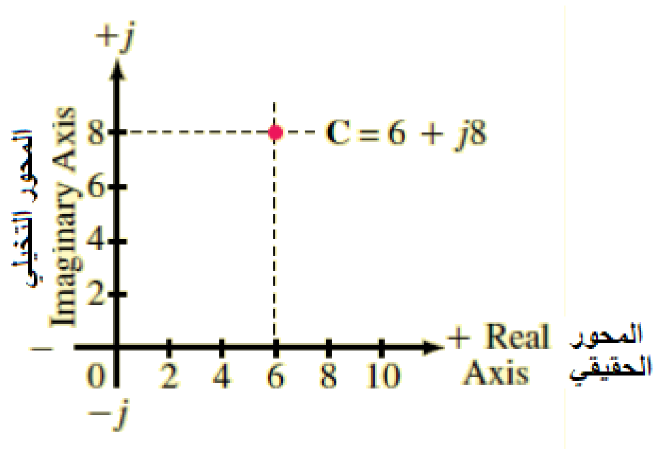
$$Z_{pu.\text{مثلثي}} = \frac{I_{bL}(Z/3)}{V_b} = \frac{\sqrt{3} I_b (Z/3)}{V_{bL}/\sqrt{3}} = Z_{pu.\text{مثلثي}}$$

لذا فإذا عينت ممانعة محول في نظام نسبة الوحدة فإنه ليس من الضروري معرفة ما إذا كانت الملفات نجمية أم مثلثية إلا في التحليل النهائي وعندما يتطلب إيجاد توزيع التيارضمن المحول نفسه. وفي حالة كون محول مربوط على شكل مثلثي / نجمي، يجب الأخذ بعين الإعتبار تغير الطور بزاوية مقدارها 30° بين الابتدائي والثانوي للفولتية في مثل هذا النوع من الربط.

6-1 العامل المدور – h   h-OPERATOR

من المفروض أن يكون المهندس القارئ حسن المعرفة بالعامل المدور j والذي يعرف بانه العامل الذي إذا يضرب بمطاور (متجه) فإنه يدوره بزاوية مقدارها 90° في الاتجاه الموجب (عكس اتجاه عقرب الساعة) بدون أي تغيير في مقداره . على هذا الأساس يكتب (في اصطلاح الصيغة القطبية $j = 1\angle 90°$، وفي الاحداثيات التربيعية الهندسية نستطيع ان نكتب العامل j بوصفه j=0+j1 . ففي الشكل 1-6 ، إذا تم ضرب مطاوراً أحادي القيمة $1\angle 0°$ فسوف يتحرك من الوضع x+ على المحور السيني إلى الوضع y+ على المحور الصادي لتعطي $j \times 1 = 1\angle 90°$. ويسمى المحور السيني بالمحور الحقيقي، ويسمى المحور الصادي بالمحور التخيلي في المستوي المركب.

عليه فان j يخضع للقواعد الجبرية الاعتيادية للأعداد المركبة. ولتمثيل العدد المركب C=6+j8 فان هذا العدد سوف يمثل نقطة التي إحداثياتها على المحور الحقيقي 6 وعلى المحور التخيلي 8 كما موضح في الشكل 1-6 . وهذا يعني أنه لضرب عددين مركبتين فيتم ضرب مقداريهما وجمع طوريهما. لذلك فإن العامل $j = \sqrt{-1}$ حيث يسمى بالعدد التخيلي استناداً إلى حقيقة أنه لا يوجد عدد موجب (أو سالب) على المحور السينى والذي إذا ما ضرب بنفسه سوف يعطي -1 .



الشكل 1-6 تمثيل العدد المركب.

وإذا تم ضرب المطاور الأخير هذا بـ j آخر فستكون النتيجة:

$$j \times (j+1) = 1 = -1\angle 180°$$

علاقات أخرى للعامل j :

$$j^2 = (\sqrt{-1})(\sqrt{-1}) = -1$$

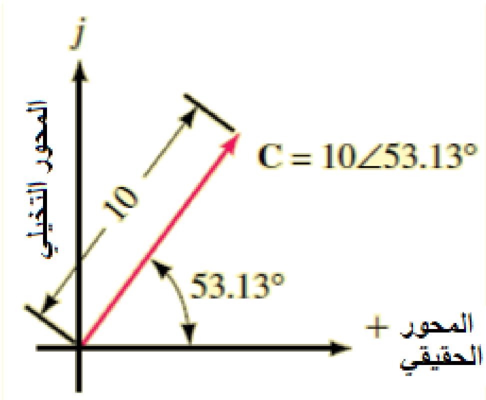
$$j^3 = j^2 \times j = -j$$

$$j^4 = j^2 j^2 = (-1)(-1) = 1$$

$$(-j) \times j = 1$$

$$\frac{1}{j} = \frac{1}{j} \times \frac{j}{j} = \frac{j}{j^2} = -j$$

يمكن أيضا تمثيل العدد المركب بالصيغة القطبية وهو التمثيل بالصيغة القطبية بالمقدار والزاوية للنقطة C= a+jb أي أن $\mathbf{C} = 10\ \angle 53.13°$ كما مبين في الشكل 1- 7 .



الشكل 1-7 تمثيل العدد المركب بالصيغة القطبية.

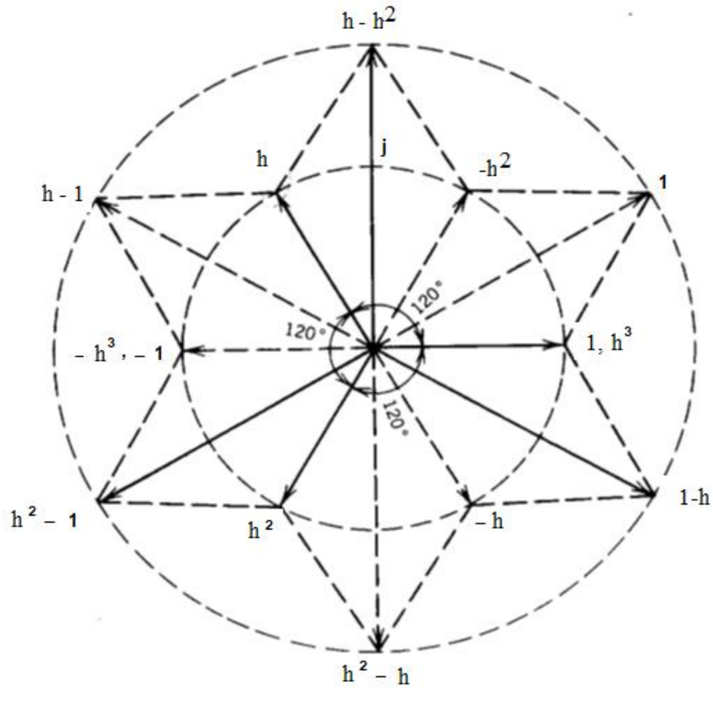
بما أن مهندسي القدرة الكهربائية يهتمون بصورة رئيسية بالدوائر الثلاثية الطور فإنه من الطبيعي أن تمتد الفكرة أعلاه إلى عامل مدور بـ °120. عليه فاننا سنعرف العامل h=1 ∠120° وهو العامل الذي اذا تم ضربه بمطاورفانه يدوره بزاوية °120 فى الإتجاه الموجب (عكس عقرب الساعة) بدون أي تغيير في مقداره . لذا فان $h^2 = 1\angle 240° = 1$ وكذ لك $h^3 = 1\angle 360° = 1\angle 0°$ فعليه $h = \sqrt[3]{1}$ وتنشأ ثلاثة جذور للتكعيب للقيمة واحد وهي $1 \quad h \quad h^2$. وإذا ما أريد التحويل إلى الإحداثيات التربيعية ينتج:

بما أن $\sin 60° = \frac{\sqrt{3}}{2}$ وكذلك $\cos 60° = \frac{1}{2}$ فإن

$h = -1/2 + j\sqrt{3}/2$ وكذلك $h^2 = -1/2 - j\sqrt{3}/2$. ولما كان: $(1 + h + h^2) = 0$ ، لذا يسمى هذا بالعامل عديم القيمة وإذا ما ضرب بأي مطاور فسوف تؤول قيمة ذلك المطاورالى الصفر . فإذا كان V يمثل مطاوراً ما مثلاً فإن:

$$(1 + h + h^2)V = V + hV + h^2V = 0$$

التفسير الهندسي لما ورد في أعلاه هو كونه مثلثاً متساوي الاضلاع والمجموع الاتجاهي لاضلاعه يكون صفرا. وبمجرد التفكير في وظيفتي العاملين j و h فانه يمكن الحصول على سلسلة من العوامل لفترات مقدارها 30° وكما مبين في الشكل1-8. هذه العوامل تكون مهمة عند التعامل مع المركبات المتماثلة Symetrical components وكذلك حسابات الأعطال غير المتماثلة.



الشكل 1-8 العوامل لفترات مقدارها30° .

والافكارالسالفة هذه في أعلاه يمكن أن تعمم بحيث يمكننا أن نقوم بتعريف عاملاً ما مثل $A(\theta)$ بانه العامل الذي يضرب قيمة المطاور بالمقدار A ويزيد زاوية طوره بزاوية θ في الاتجاه الموجب لذلك فإن:

$$A(\theta) = A/\underline{\theta}$$

$$= A(\cos\theta + j\sin\theta) = Ae^{j\theta} = A\exp(j\theta)$$

إن التمثيل بهذه الطرق الأسية لبيان مطاور له مقدار واتجاه تعتبر من الطرق الأساسية والشائعة فى هذا المجال في كتب الرياضيات المعدة لاغراض التدريس.

7-1 المركبات المتماثلة Symmetrical Components

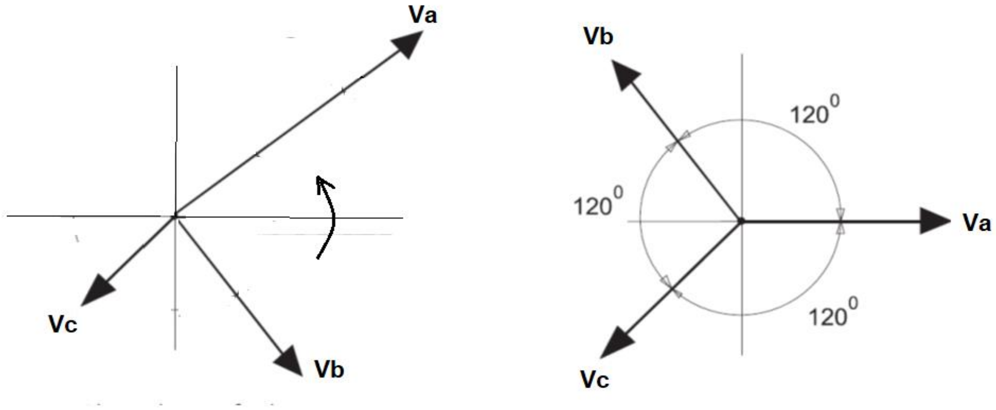
تستخدم طريقة المركبات المتماثلة لتحليل الأنظمة الكهربائية غير المتماثلة بصورة عامة وتحليل الأعطال غير المتماثلة بصورة خاصة. هذه الفقرة مخصصة لمناقشة المبادئ العامة لهذه الطريقة وإعطاء أمثلة حول كيفية تطبيقها.

من المعروف إنه في الأنظمة ثلاثية الطوريسبب التحميل غير المتوازن على الأطوار تيارات وفولتيات غير متوازنة وكذلك هي الحالة في وقوع الأعطال للأرض في خطوط نقل الطاقة وكذلك الانقطاعات في الخطوط نفسها أو نتيجة آليات القطع والوصل في المنظومات الكهربائية. كذلك فان الغالبية العظمى من أعطال منظومة القدرة وخاصة خطوط النقل ليست دوائر قصيرة ثلاثية الطور متماثلة ولكنها تحدث بين خط واحد والأرض والأقل شيوعا هي التي تحدثُ بين الخطوط والتي قد تشمل الأرض أيضاً. وتوجد عادة ممانعة عطل محدودة بدلاً من دائرة قصيرة، وهكذا فبدلاً من وجود دائرة ثلاثية الطور مسلطة عليها ثلاث فولتيات متوازنة في المقدار والزاوية تماماً، كما في الشكل 1-9 (أ) التي يمكن أن تحل بحساب التيار الجاري في أحد الأطوارالثلاثة فقط، ففي هذه الحالة يجب أن نحاول حل دائرة ثلاثية الطورتؤثر عليها فولتيات غير متوازنة كما مبينة في الشكل1-9 (ب).

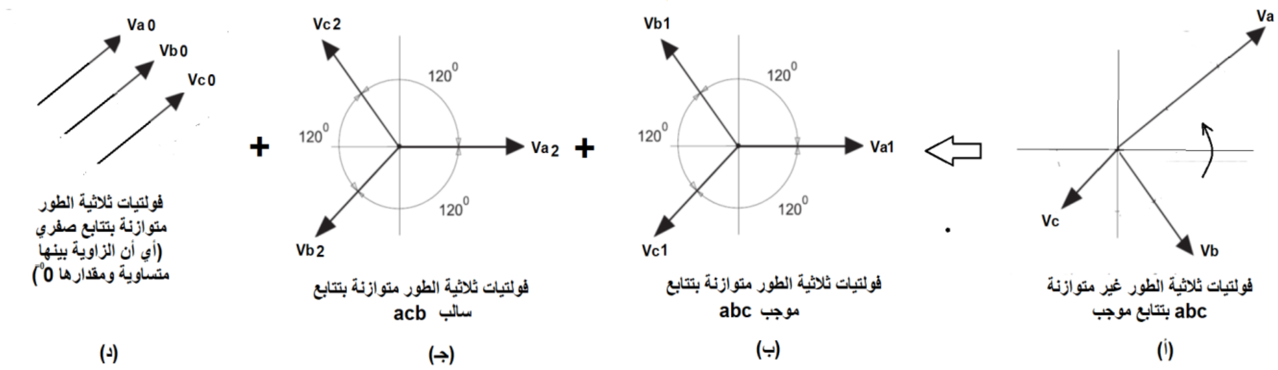
في هذه الطريقة يتم تحليل الفولتية ثلاثية الطور غير المتوازنة إلى ثلاث مركبات أو أنظمة ثلاثية الطور متوازنة مستقلة عن بعضها البعض. هذه المركبات أو الأنظمة تسمى كالآتي:

- نظام التتابع الموجب Positive-sequence system
- نظام التتابع السالب Negative -sequence systemero-sequence system
- نظام التتابع الصفري Zero-sequence system

هذه الأنظمة أو الشبكات الثلاث تسمى أيضاً بالمركبات المتماثلة Symmetrical components وكما موضحة في الشكل 1-10.



الشكل 1-9 فولتيات ثلاثية الطور: (أ) متوازنة في المقدار والزاوية، (ب) غير متوازنة لا بالمقدار ولا بالزاوية.



الشكل 1-10 تحليل الفولتية ثلاثية الطور غير المتوازنة إلى ثلاث مركبات (أنظمة) متوازنة.

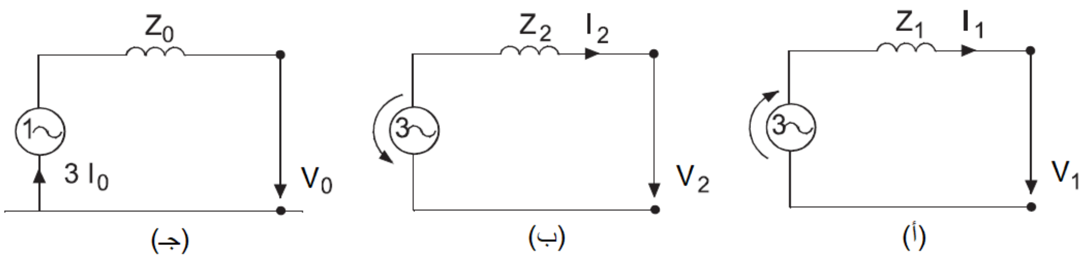
وخلاصة نظرية المركبات المتماثلة تنص على أنه باستعمال مبدأ التراكب في الشبكات الخطية فان أية مجموعة من المطاورات الثلاثية الطور غير المتماثلة ذات تتابع abc ، مثلاً الفولتيات V_a و V_b و V_c يمكن إبدالها بحاصل جمع ثلاث مجموعات من الفولتيات:

(i) مجموعة تتابع موجب ذات ثلاثة فولتيات ثلاثية الطور متماثلة (أي متساوية كلها رقمياً ومزاحة بعضها عن بعض بمقدار 120° لها التتابع نفسه abc كما في المجموعة الأصلية ويرمز لها بالرموز V_{a1} و V_{b1} و V_{c1} .

(ii) مجموعة تتابع سالب ذات ثلاثة فولتيات ثلاثية الطور متماثلة لها تتابع معاكس لتلك التي في المجموعة الاصلية أي acb ويرمز لها بـالرموز V_{a2} و V_{b2} و V_{c2} .

(iii) مجموعة تتابع صفري ذات ثلاثة فولتيات كلها متساوية في المقدار والطور أي ليس لها تتابع ويرمز لها بـالرموز V_{a0} و V_{b0} و V_{c0} وكلها تساوي V_0 .

هذه المجموعات الثلاث من المركبات المتماثلة موضحة في الشكل 1-10. والممانعات الخاصة بكل مجموعة من هذه المجموعات الثلاثة يمكن أن تستخرج من طبيعة عدم الإتزان أو نوعية العطل لإشتغال الأنظمة أو مكان نقطة العطل نفسه. وبحسب موقع العطل تنشأ تيارات غير متساوية في موصلات الخطوط وبذلك سوف لايمكن استخدام الدائرة المكافئة الواحدة (للطور الواحد) في هذه الحالة. ممانعات هذه الشبكات الثلاث بعضها يختلف عن تلك التي تستعمل في تحليلات الشبكات الثلاثية الطور المتوازنة تماما والتى عند استعمالها أو تعريفها يجب ان تسبق كلها بكلمات " ممانعة التتابع الموجب Z_1 أو ممانعة التتابع السالب Z_2 أو ممانعة التتابع الصفري Z_0 " بالتحديد كما في الشكل 1-11.



الشكل 1-11 الدوائر المكافئة للمركبات المتماثلة: (أ) التتابع الموجب، (ب) التتابع السالب، (جـ) التتابع الصفري.

وتجدر الإشارة إلى أن معرفة الممانعات أعلاه الخاصة بكل مركبة متماثلة يمكن الحصول على التيارات غير المتوازنة بالأسلوب نفسه لتحليل الفولتيات كما ورد سلفاً. لذا فان أية مجموعة من التيارات الثلاثية الطورغير المتماثلة ذات تتابع abc ، مثلاً التيارات I_a و I_b و I_c يمكن إبدالها بحاصل جمع ثلاث مجموعات من التيارات:

(i) مجموعة تتابع موجب ذات ثلاثة تيارات ثلاثية الطور متماثلة (أي متساوية كلها رقمياً ومزاحة بعضها عن بعض بمقدار 120°) لها التتابع نفسه abc كما في المجموعة الأصلية ويرمز لها بـ I_{a1} و I_{b1} و I_{c1} حيث:

$$I_{a1} = \frac{V_{a1}}{Z_1} \quad , \quad I_{b1} = \frac{V_{b1}}{Z_1} \quad and \quad I_{c1} = \frac{V_{c1}}{Z_1}$$

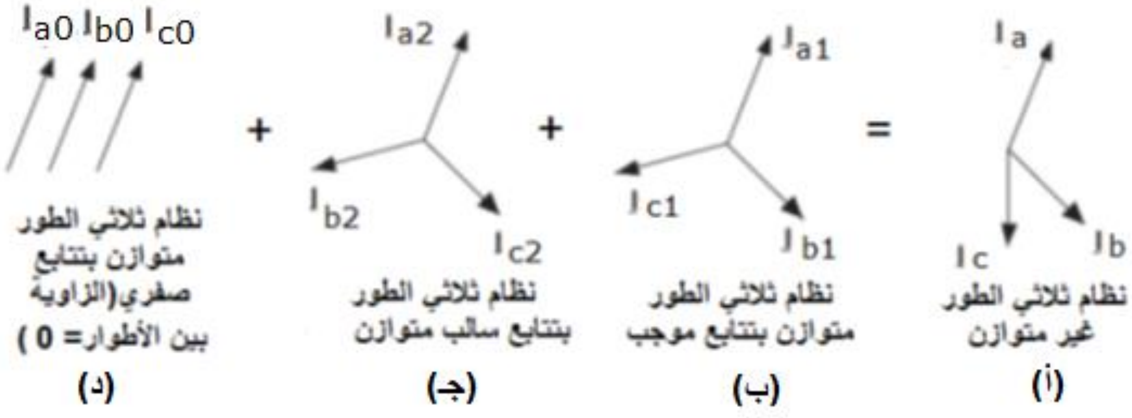
(ii) مجموعة تتابع سالب ذات ثلاثة تيارات ثلاثية الطور متماثلة لها تتابع معاكس لتلك التي في المجموعة الاصلية اي acb ويرمز لها بـ I_{a2} و I_{b2} و I_{c2} حيث :

$$I_{a2} = \frac{V_{a2}}{Z_2} \quad , \quad I_{b2} = \frac{V_{b2}}{Z_2} \quad and \quad I_{c2} = \frac{V_{c2}}{Z_2}$$

(iii) مجموعة تتابع صفري ذات ثلاثة تيارات كلها متساوية في المقدار والطور أي ليس لها تتابع ويرمز لها بـ I_{a0} و I_{b0} و I_{c0} وكلها تساوي I_0 حيث :

$$I_{a0} = \frac{V_{a0}}{Z_0} \quad , \quad I_{b0} = \frac{V_{b0}}{Z_0} \quad and \quad I_{c0} = \frac{V_{c0}}{Z_0}$$

الشكل 1-12 التالي يوضح المجموعات الثلاث من المركبات المتماثلة للتيارات.



الشكل 1-12 تحويل النظام ثلاثي الطور غير المتماثل إلى ثلاث مركبات ثلاثية الطورمتماثلة.

سنبين لاحقا ان القيم النسبية لمركبات التيار الثلاثة في أي خط (I_{a1} و I_{a2} و I_{a0}) وزوايا الطور النسبية بينهما ستتغيرمن ظرف عطل غيرمتماثل إلى آخر. لذلك يوضح الشكل 1-12 مجموعة ظروف خاصة واحدة فقط. يجب أن يلاحظ أنه رغم أن التتابع acb للتتابع السالب يكون معاكسا للتتابع الموجب فإن مجموعة مطاورات التتابع السالب يجب أن تؤخذ على أنها تدور باتجاه (عكس اتجاه عقارب الساعة) أي عكس اتجاه دوران مطاورات التابع الموجب

إن طريقة المركبات المتماثلة يمكن أن تطبق على أي نظام متعدد الأطوار حاوي على أي عدد من الأطوار، لكن في مبحثنا هذا سنتطرق فقط للنظام ذي الأطوار الثلاثة الشائع.

وكما تم بيانه إن الشكل 1-10 يوضح المجموعات الثلاث من المركبات المتماثـلة. سنبين مؤخرا ان القيم النسبية لمركبات التيار الثلاثة في اي خط (I_{a1} و I_{a2} و I_{a0}) وزوايا الطور النسبية بينهما ستتغيرمن ظرف عطل غيرمتماثل الى اخر. ويجب أن يلاحظ أنه رغم أن التتابع acb للتتابع السالب يكون معاكساً للتتابع الموجب فإن مجموعة مطاورات التتابع السالب يجب ان تؤخذ على أنها تدوربعكس اتجاه مطاورات التابع الموجب .أي أنه عند اضافة تيارات التتابع السالب إلى تيارات التتابع الموجب تكون المحصلة مجموعة من ثلاثة تيارات ثلاثية الطور غير متماثلة ، لكن المجموع الطوري لهذه التيارات الثلاثة سيكون صفراً لان مجموعتي المركبات هي مجموعات ثلاثية الطور متماثلة أي أنه إذا كان.

$$I_a = I_{a1} + I_{a2}$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2}$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2}$$

فالجمع يعطينا $I_a + I_b + I_c = 0 + 0$

وهكذا فتحت ظروف عدم التوازن ستكون هناك، بصورة عامة محصلة تيار كلية هي حاصل جمع تيارات الخط الثلاثة ، مثلاً عندما يكون هناك عطل أرضي . التيار الجاري في مسار الأرضي والذي هو حاصل جمع تيارات الخط الثلاثة يجب أن يكون حاصل جمع تيارات التتابع الصفري الثلاثة لأن حاصل جمع مركبات التتابع الموجب والسالب هو صفر. وهكذا فتيار المسار الأرضي يساوي

$$= I_{a0} + I_{b0} + I_{c0}$$

$$= 3I_{a0} = 3I_0 \qquad (1.8)$$

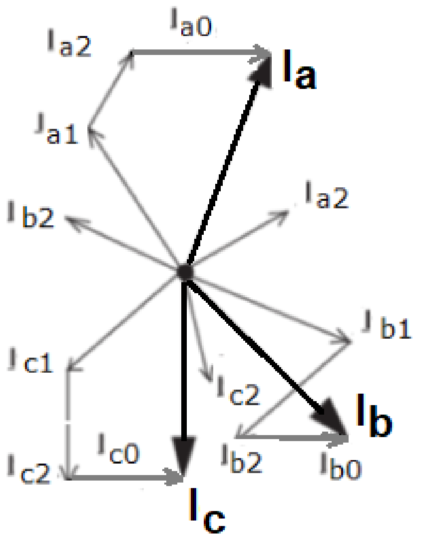
المجموعات الثلاث لتيارات التتابع كل منها متماثل بنفسه ويمكن أن تحسب على أساس الطور الواحد (او لكل طور واحد للربط النجمي) مع تيار فعلي يمر في أي من الأطوار معطى بحاصل جمع تيارات التتابع الثلاثة الخاصة به. أي

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_b = I_{b1} + I_{b2} + I_{b0}$$

$$I_c = I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}$$

والشكل 1-13 يبين تفاصيل التيارات غير المتوازنة التي حصلنا عليها بجمع المركبات المتماثلة المبينة في الشكل1-10.



الشكل 1-13 المجموع الإتجاهي لتيارات المركبات المتماثلة.

بأستعمال العامل المدور h الذي تمت مناقشته في الفقرة السابقة ، فالمعادلات (1.8) ستختزل إلى

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} + I_{a0}$$

$$I_b = \mathrm{h}^2 I_{a1} + hI_{a2} + I_{a0} \qquad (1.9)$$

$$I_c = \mathrm{h}I_{a1} + h^2 I_{a2} + I_{a0}$$

المعادلات الثلاث في (1.9) يمكن أن تحل الآن لأيجاد مركبات التيار الثلاث بدلالة التيارات الثلاثة للمنظومة الفعلية على شرط ان المحدد قيمته تساوي صفر، أي أن :

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ h^2 & h & 1 \\ h & h^2 & 1 \end{vmatrix} \neq 0$$

على القارئ أن يثبت بنفسه أن المحدّد له قيمة تساوي $j\ 3\sqrt{3}$ ولا تساوي صفراً. لكي نجد I_{a1} فأن المعادلة الثانية في (1.9) يجب أن تضرب بالمدور h والمعادلة الثالثة تضرب بـ h^2 وهاتان المعادلتان يمكن أن يضافا إلى المعادلة الأولى . والنتيجة تكون

$$I_{a1} = (1/3)(I_a + hI_b + h^2 I_c)$$

$$I_{a2} = (1/3)\,(I_a + h^2 I_b + hI_c) \qquad (1.10)$$

$$I_{a0} = (1/3)(I_a + I_b + I_c)$$

المركبات الثلاث المذكورة للتيارفي طور a يمكن أن تعد كأنها جارية في ثلاث ودوائر وهمية مفردة الطور مقترنة مع بعضها عند نقطة العطل بطريقة تعتمد على طبيعة العطل إذا كان هناك أي تقارن متبادل بين هذه الشبكات الثلاث فأن التحليلات ستكون أكثر تعقيدا. لذلك فقبل التبصر في مثل هذه الشبكات سنتبصر في الظروف التي عندها لا يوجد تقارن متبادل فيما بينها والتي هي الحالة العامة في منظومة القدرة وخطوط النقل. لذلك يكفي أن نركز على مركبات التيار I_{a1} و I_{a2} و I_{a0} حيث أن تياري الطورين b و c يمكن إيجادهما من (1.9) .

1-8 تعريف الفولت -أمبير ، القدرة ، والقدرة المتفاعلة

في آية دائرة من دوائر التيار المتناوب إذا كانت الفولتية $v = \sqrt{2}V \sin \omega t$ والتيار $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \emptyset)$ فإن القدرة اللحظية تعطى كما يلي

$$\mathrm{p = vi = VI}[\cos \emptyset - \cos(2\omega t - \emptyset)]$$ واط

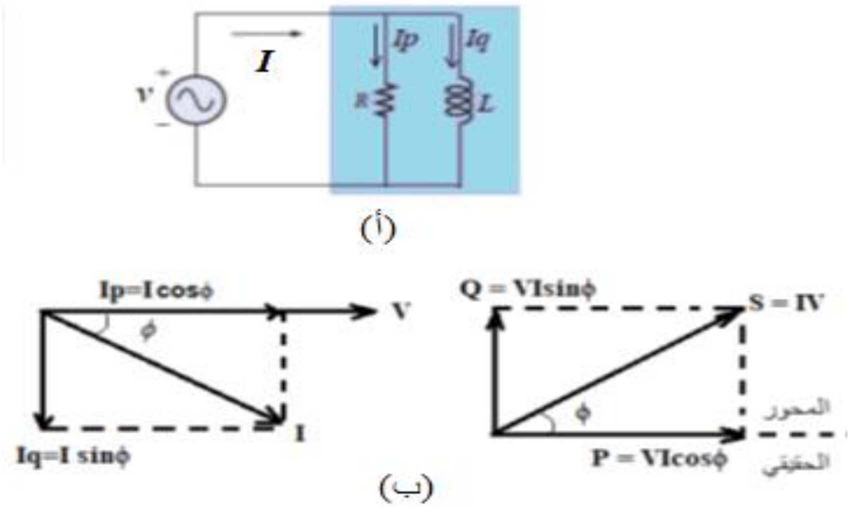
حيث أن V و I هما قيم جذر متوسط التربيع، وهذا يبين أن القدرة تحتوي على مركبات لها تردد مضاعف أي أنها تبدل إشارتها كل نصف دورة (من التردد المضاعف) وفي اتجاه جريان الطاقة وان معدلها يكون صفراً إذا ما تم أخذه على مدى عدد من الدورات الكاملة لذلك فإن معدل القدرة يكون $P = VI \cos \emptyset$. وهذه المعاد لة يمكن إعادة كتابتها بالصيغة التالية:

$$p = VI \cos \emptyset - (VI \cos \emptyset) \cos 2\omega t - (VI \sin \emptyset) \sin 2\omega t \quad (1.11)$$ واط

حيث أن الحد الأول يعطي معدل القدرة $P = VI \cos \emptyset$ المتدفقة من المصدر إلى الحمل والذي إذا ماضرب بالزمن فسوف يعطي الطاقة المستهلكة، أما الحد الثاني فيمثل جريان قدرة متذبذباً بتردد مضاعف معدل قيمته صفر واتساعه يساوي P وهذا يكون أعظم مايمكن عند عامل قدرة بقيمة واحد. ويكون صفراً عند عامل قدرة صفري. أما الحد الثالث فهو أيضاً عبارة عن تدفق قدرة متذبذب بتردد مضاعف ومعدل قيمته صفر واتساعه فهو $Q = VI \sin \emptyset$. وهذا يعني كونه صفراً عند عامل قدرة واحد. وأقصى ما يمكن عند عامل قدره صفري. إن هاتين القدرتين تكونان متعامدتين مع بعضهما في حيز الزمن.

إذا تم إعتبار الحمل محاثة ومقاومة على التوازي كما في الشكل 1-14 (أ) فان الفرع الذي يحتوي على المقاومة سوف يأخذ تياراً فعالاً مقداره $I_P = I \cos \emptyset$ ويستهلك قدرة P . وسوف تتذبذب قدرة $P \cos 2\omega t$ بين المصدر وبين الفرع ذي المقاومة R ، بينما الفرع ذوالمحاثة L

سوف يأخذ تياراً متفاعلاً متأخراً $I_q = I \sin \emptyset$ وستتكون هناك قدرة $Q \sin 2\omega t$ تتذبذب بين المصدر والفرع ذي المحاثة L .

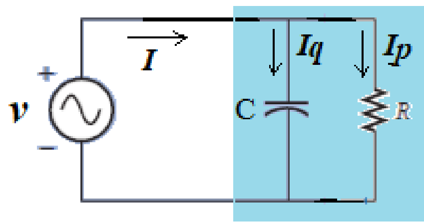


الشكل 1- 14 القدرة المتفاعلة (vars): (أ) الدائرة ، (ب) حمل حثي.

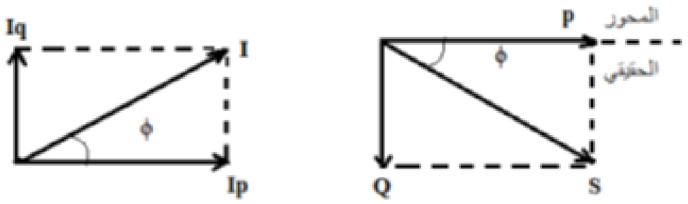
إن $Q(= VI \sin \emptyset)$ تدعى بالقدرة المتفاعلة (الفولت - امبيرات المتفاعلة اوvars) لهذه الدائرة، وتكتب وحداتها المناظرة بصيغة VAr. ويعد الحمل RL مصبا للقدرة P ويقال عنه انه مصب للقدرة المتفاعلة المتاخرة Q (vars). ومما يجب ملاحظته من المعادلة (1.11) أن Q تمثل اتساعاً لقدرة تتذبذب بتردد ضعف تردد المصدر بين المصدر نفسه وبين المجال الكهرومغناطيسي للحمل الحثي.

مما مر في أعلاه يتبين أن المولد هو مصدر للقدرة وكذلك للقدرة المتفاعلة vars المتأخرة. من ضمن الأتفاقيات العالمية فأن القدرة المتفاعلة المتأخرة التى تأخذها الأحمال الحثية والتي على هذا الأساس تتدفق في اتجاه القدرة الحقيقية نفسها، لذلك فأنها تكون ذات قيمة موجبة.

الآن إذا فرض أن الحمل هو دائرة تواز RC (الشكل 1-15 (أ)) فإنه من الواضح أن المركبة الفعالة (القدرة) للتيار I_p تبقى بالطور نفسه مع التيار المقابل في الدائرة الحثية وذلك لكون اتجاه تدفق القدرة للدائرتين واحد. لكن المركبتين المتفاعلتين للتيار تكونان في طورين متضادين، وعليه تكون القدرتان المتذبذبتان بتردد مضاعف $Q \sin 2\omega t$ في طورين متضادين ايضاً. كذلك تكون القدرة المتفاعلة المقابلة في طورين متضادين أيضاً. لذا فأنه يمكن أعتبار القدرة المتفاعلة المقابلة في طورين متضادين أيضاً. لذا فأنه يمكن أعتبار القدرة المتفاعلة المتقدمة بوصفها قدرة متفاعلة سالبة تتدفق من المصدر الى الحمل أو بوصفها قدرة متفاعلة موجبة تتدفق من الحمل إلى المصدر. لهذا السبب فأن عمل متسعة تحسين عامل القدرة



(أ)



(ب)

الشكل 1-15 القدرة المتفاعلة (vars): (أ) الدائرة ، (ب) حمل سعوي.

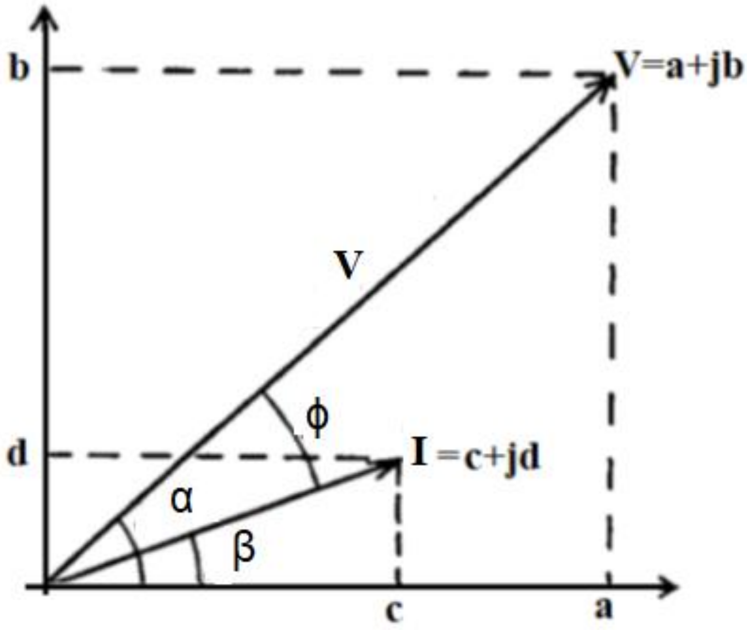
المربوطة عبر حمل حثي يمكن تفسيره بالقول أن المتسعة تولد قدرة متفاعلة متأخرة التي بدورها تجهز إلى الحمل نفسه وبذلك تقلل من الطلب على القدرة المتفاعلة المتأخرة من المصدر ذاته.

عند التعامل مع المحركات التزامنية فأن اتجاه الإسناد يأخذ دائماً بما يدخل إلى المحرك. وهذا يعني أن المحرك يأخذ تياراً وقدرة حقيقية إذا أشتغل بعامل قدرة متأخر، ففي هذه الحالة سيكون مصباً للقدرة المتفاعلة الـ vars المتأخرة، وإذا أشتغل بعامل قدرة متقدم فإنه سيكون مصباً للقدرة المتفاعلة الـ vars المتقدمة، أويكون مصدراً للقدرة المتفاعلة الـ vars المتأخرة.

فى حالة خط نقل فأن محاثة التوالى تعد مصباً للقدرة المتفاعلة المتأخرة مساوية إلى I^2X_L حيث ان $X_L = 2\pi fL$ ، بينما تعد متسعة التوازي كونها مصباً للقدرة المتفاعلة الـ vars المتقدمة (مصدرللـ vars المتاخرة) مساوية لـ V^2/X_c حيث أن $X_C = 1/2\pi fC$.

من المعتاد في منظومات القدرة الأشارة دائماً الى الـ vars المتأخرة (ولايشارالى القدرة المتفاعلة المتقدمة). لذا فاذا كانت محطة قدرة تولد بعامل قدرة متأخر فيقال عنها أنها تصدرالواطات وكذلك الـ vars (المتأخرة) بينما إذا كانت تولد عند عامل قدرة متقدم يقال عنها أنها تصدر الواطات وتستورد القدرة المتفاعلة (إن أستيراد القدرة المتفاعلة المتأخرة (الموجبة) يكون مكافئاً لتصدير القدرة المتفاعلة المتقدمة (السالبة)).

الشكل 1-16 يبين الفولتية عبر حمل ما وقد رسم التيار خلال هذا الحمل بأتجاهات كيفية نسبة إلى مجموعة من محاور تربيعية، إلا أن I يتأخرعن V بزاوية قدرها $\emptyset$.



الشكل 1-16 المركبات التربيعية (الأفقية والشاقولية) للفولتية V والتيار I.

$$P = VI\cos\emptyset = VI\cos(\alpha - \beta)$$

$$= VI[(\cos\alpha)(\cos\beta) + (\sin\alpha)(\sin\beta)]$$

$$= ac + bd$$

$$Q = VI\sin\emptyset$$

$$= VI[(\sin\alpha)(\cos\beta) - (\cos\alpha)(\sin\beta)]$$

$$= bc - ad$$

وتفسير هذه المعادلات هو أن ac يمثل القدرة المتسببة عن مركبة الفولتية ومركبة التيار كليهما على المحور السينى، وبالتشابه bd على المحور الصادي وأن هذه المركبات تجمع إلى بعضها حسابياً حيث تمثل bc أيضاً القدرة المتفاعلة المتسببة عن مركبة تيار متاخرة عن مركبة فولتية بينما ad تمثل القدرة المتفاعلة بالنسبة إلى مركبة تيار تتقدم على مركبة فولتية.

قد يلاحظ منطقياً محاولة الحصول على الفولت ـ أمبير من حاصل ضرب الفولتية والتيار بوصفها أعداداً مركبة، لذلك

$$(a + j\,b)(c + j\,d) = (ac - bd) + j(bc + ad)$$

وهذه النتيجة تكون غير صحيحة بصورة واضحة. أما النتيجة الصحيحة فيمكن الحصول عليها باستخدام مترافق التيار I^* في مكان التيار نفسه حيث

$$I^* = I \angle - \beta = c - jd$$

عليه فان

$$S = VI^* = (a + j\,b)(c - j\,d)$$

$$= (ac + bd) + j\,(bc - ad)$$

$$= P + j\,Q$$

ويتفق استخدام مترافق التيارمع اصطلاح القدرة المتفاعلة المتأخرة المأخوذة باشارة موجبة عندما تتدفق إلى حمل حثي في اتجاه القدرة نفسه.

ومع أن القدرة الحقيقية بلواط والقدرة المتفاعلة بالفولت - أمبير كليهما ليستا مطاورات بحد ذاتها، إلا انها تعد متجهات وذلك لكونها تمتلك اتجاهات بالنسبة إلى بعضها البعض، لذا لكي يكون الدخل بالفولت – أمبير لحمل معين نستطيع أن نعبر عنه كالتالي:

$$S = P + j\,Q$$

وبأخذ فولتية الحمل بوصفها مطاوراً مرجعاً فإن تيار الحمل المقابل يكون

$$I = I_p - jI_q$$

ولما كانت طبيعة المهندسون في معاملة معظم الكميات التي تتكرر دائماً (مثل القدرة المتفاعلة المتاخرة) على أنها كميات موجبة قد أدت إلى هذا التضارب الظاهري في الإشارة. وطبقاً للمواصفات القياسية الدولية فان الفولت - أمبير يطلق عليها إسم " القدرة الظاهرية".

الفصل الثاني

نقل القدرة الكهربائية

ELECTRIC POWER TRANSMISSION

1-2 مقدمة

يتم توليد الطاقة الكهربائية في محطات خاصة متنوعة يكون إنشائها في الغالب في مناطق بعيدة عن المدن وأماكن استهلاكها، وتنقل الطاقة الكهربائية من محطات التوليد إلى أماكن الاستهلاك بواسطة أسلاك معدنية تسمى خطوط نقل القدرة الكهربائية التي تكون أطوالها وتصاميمها ومن ثم تحليلاتها الهندسية مختلفة عن بعضها البعض بصورة عامة. ويتضمن هذا الفصل مناقشة نظرية خطوط نقل القدرة الكهربائية التي تعمل في ظروف اشتغال مستقرة. في البداية سيتم التطرق إلى تعديد الخواص العامة لنظام نقل Transmission system اعتيادي مستخدم في أكثر بلدان العالم يعمل بتردد مقداره 50 هرتز. على هذا الأساس فان جميع المعلومات والتعليقات على الأمثلة النموذجية التي سترد في هذا الفصل (وبصورة عامة خلال جميع فصول هذا الكتاب) ستكون منسوبة إلى أنظمة قدرة تعمل جميعها بتردد 50 هرتز.

من المعروف أن وظيفة خطوط النقل هي نقل الطاقة الكهربائية عبر مسافات طويلة ويتم نقل هذه الطاقة أما بالتيار المتناوب أو بالتيار المستمر، وتصنف هذه الخطوط على نوعين رئيسيين:

1- خطوط علوية معلقة (هوائية) (Overhead Lines)

2- كيبلات أرضية (Underground cables)

وتصمم معظم خطوط نقل القدرة من النوع الهوائي العلوي المعلق، وتستخدم فيها أسلاك عارية غير معزولة حيث يستفاد من الهواء المحيط كوسط عازل لتقليل الكلفة. أما في المناطق المأهولة بالسكان حيث يصعب استخدام الخطوط الهوائية لعدم وجود الفضاءات الضرورية وكذلك لكونها تنتج مجالات مغناطيسية وكهربائية مصاحبة لها قد تكون لها آثار سلبية على صحة البشر خاصة عندما تستخدم فولتيات عالية في النقل، لذلك يفضل استخدام الكيبلات الأرضية لنقل الطاقة الكهربائية في مثل هذه الاماكن. وفي هذا الفصل سيتم الاهتمام بالخطوط الهوائية كونها الأكثر إستخداما في نقل الفولتيات والقدرات العالية.

تقتصر خطوط النقل على استخدامها لموصلات مصنوعة من النحاس عالي النقاوة أو الألمنيوم المرن المقوى بأسلاك الحديد الصلب (أسلاك الفولاذ Steel wires). وتسمى هذه الموصلات بموصلات الألمنيوم المقواة ذات القلب الفولاذيACSR . وبسبب الكلفة الباهظة للموصلات المصنوعة من النحاس فان موصلات الألمنيوم الأرخص ثمنا هي الأكثر استخداماً في الوقت الحاضر.

بصورة عامة يقوم خط النقل Transmission Line بنقل القدرة الكهربائية من محطة إرسال (S) إلى محطة استلام (R) بصورة مباشرة، حيث لا يتم تجهيز أي من المستهلكين لهذه القدرة ضمن مسار الخط. وعلى العكس، فإن خط التوزيع Distribution Line أو الموزع Distributor يجهز المستهلكين مباشرة وعلى مسافات قصيرة على طول الخط ، لذلك فإن موزع القدرة هذا يخضع للمتطلبات القانونية ، وهي أن القدرة يجب أن تجهز بفولتية تتغير ضمن ±6% من الفولتية المنصوص عليها (خدمة أو مقننة). في حين أن خط النقل لا يخضع لهذه التحديدات أو الضوابط حيث يمكن أن تتغير فولتيته بنسبة قد تصل إلى 10 أو حتى 15% بسبب التغيرات الحادثة في الحمل. عليه فإن أي تحديد على فولتية خطوط النقل يعد فنياً وليس قانونياً. ومن الناحية العملية فان التفريق بين النقل والتوزيع ليس واضحاً بصورة مقطوعة حيث أن العديد من المستهلكين الكبار ذوي المصانع والمنشآت الكبيرة في بعض البلدان يجهزون في الوقت الحاضر بفولتية 132 كيلو فولت فما فوق مباشرة من خطوط النقل، وهناك أيضاً أحمال أحادية الطور تكون مأخوذة من طورين اثنين لخط نقل ذي فولتية 132 كيلو فولت . ويشار إلى نظام القدرة مجتمعاً بـ" الشبكة الكبرى". أما الانظمة ذات 275 كيلو فولت و 400 كيلو فولت فتسمى بـ " الشبكة الفائقة " .

وعلى الرغم من أن شبكة 420 – 400 كيلوفولت المستخدمة في أكثر بلدان العالم كانت كافية لتلبية الاحتياجات والمتطلبات الأساسية لكثير من البلدان التي استخدمتها إلى نهاية القرن الماضي، فإن البحوث جارية لاستخدام فولتيات أعلى. فعلى سبيل المثال يجري البحث الآن على برج ناقل لفولتية مقدارها 1300 كيلوفولت.

قد تنتهي أطراف خط ناقل عند محطات توليد أو عند محطات فتح وتوصيل (أقلدة) شبكة كبرى (Grid-Switching Stations) أو عند نقاط تجهيزها. وفي محطات التوليد الحديثة عادة ما تكون قضبان التوزيع فيها (أطرافها) من النوع الذي يثبت في العراء (خارجي). أما محطات الفتح والتوصيل ضمن الشبكة الكبرى فتحتوي على قضبان توزيع خاصة مشابهة لتلك التي

تستخدم في محطات التوليد نفسها. كذلك قد تحتوي محطات الفتح والتوصيل هذه على محولات يكون الغرض منها ربط الفولتيات ذات المستويات المختلفة في الجهد الكهربائي ضمن الشبكة مع بعضها ، وأيضاً تحتوي على قواطع دائرة لإزالة الأعطال والتحكم بالنظام. أما نقطة تجهيز شبكة معينة فهي النقطة ضمن النظام التي عندها تجهز الهيئة المركزية العامة لتوليد الكهرباء الطاقة لمنطقة محدودة حيث تحتوي هذه المحطة (النقطة) بصورة عامة على محولات لخفض الفولتية إلى مستوى فولتية توزيع 33 كيلو فولت، وكذلك قواطع دائرة للسيطرة على المغذيات الخارجة. من هذه النقطة وما يلحق بها خارجاً فإن فولتية النظام يجب أن تبقى ضمن الحدود المسموح بها قانوناً.

2-2 تمثيل وتحليل خطوط النقل

لغرض تمثيل وتحليل خطوط النقل واستبيان خواص الأداء الكهربائي لها فان هذه الخواص يمكن التعبير عنها بدلالة معالم الخط الأساسية الأربعة (وتعرف أيضاً بالثوابت) التي يمكن تمثيل أي خط بواسطتها وهي:

1- محاثة الخط L (Line inductance)

2- متسعة التوازي للخط C (Line capacitance)

3- المقاومة الكهربائية للخط R (Line resistance)

4- المواصلة الكهربائية للخط G (Line conductance)

تتكون محاثة الخط L نتيجة المجالات المغناطيسية الناشئة عن مرور التيارات في الخطوط. وتعد المحاثة أكثر معالم الخط أهمية حيث تكون المفاعلة الحثية $\omega L = X_L$ هي العنصر السائد في تحديد الممانعة Z نتيجة لتأثيرها على كمية الهبوط بفولتية خط النقل، عليه فانه يجب إعطاء اهتمام خاص بمحاثة الخط وحسابها بدقة، حيث سيتم التطرق اليها في الفصل الثالث القادم.

وتنشا متسعة الخط C عن المجال الكهربائي الحادث بسبب فولتية النظام وتمثل بدائرة مربوطة على التوازي مع فولتية النظام ، هذه الفولتية عادة ما تكون فولتية الطور (خط إلى محايد) Line to neutral. كذلك فانه من النادر أن يكون العازل لخط ما على درجة من الكمال، عليه تسري تيارات متسربة على سطوح العوازل وخاصة خلال حالات الطقس الرديئة، ويكون تمثيل هذا التسرب بمقاومة توازٍ G لها قيمة أومية عالية مربوطة عبر فولتية الطور

للنظام ، عليه تكون على التوازي مع متسعة النظام . إن هذا التسرب يسبب فقدان قدرة ويكون هذا الفقدان له علاقة مع الفولتية (دالة لفولتية النظام) وليس دالة لتيار الخط.

وتسبب ظاهرة الهالة Corona (انظر الفصل الرابع) فقدان قدرة كهربائية ملموسة من النظام تعتمد قيمتها على مقدار الفولتية المستخدمة نفسها وتكون لها علاقة مع تأثير التسرب. في العادة يتم اهمال تأثيرات الهالة والتسرب (إلا إذا أعطيت المعلومات المضبوطة بخصوصها)، والسبب يعود إلى كون أن قيمة مقاومة التوازي المؤثرة عموماً أكبر بعدة مرات من المفاعلة X_C الناتجة عن المتسعة C . وتجدر الإشارة هنا إلى إن كافة التحليلات الرياضية الواردة في هذا الفصل سوف تتم على فرض أن المعالم أو الثوابت الأساسية لخطوط النقل تكون معلومة.

3-2 تصنيف خطوط النقل

تصنف خطوط نقل القدرة بصورة عامة إلى ثلاثة أنواع:

1- خطوط قصيرة

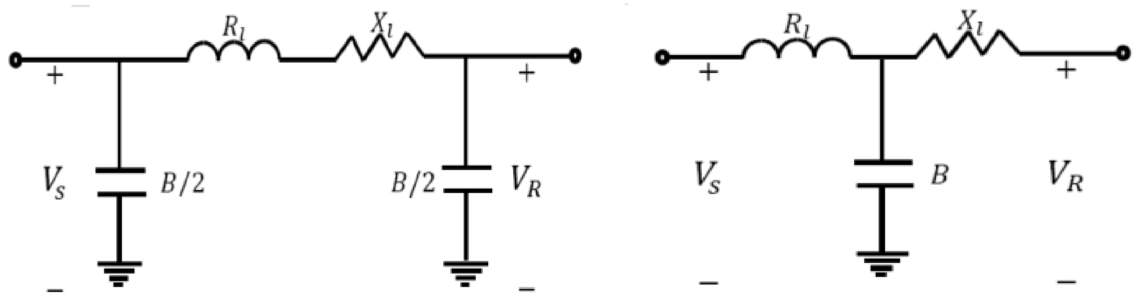
2- خطوط متوسطة

3-خطوط طويلة

ويعرف الخط القصير بأنه ذلك الخط الذي يمكن فيه إهمال تأثيرات دوائر التوازي (متسعة التوازي C والمواصلة G) بصورة كلية ، لهذا فإن الخط القصير يتم تمثيله بدائرة مكافئة بسيطة تتألف من مقاومة R مربوطة على التوالي مع محاثة L . ويستساغ هذا التقريب اعتيادياً للخطوط التي يكون طول مسارها بحدود من 50 إلى 80 كيلومتراً، ولفولتيات أقل من 35 كيلوفولت.

ويعد الخط متوسط الطول إذا كان طوله بين 50 و 150 كيلومتر وفولتية أكبر من 35 كيلوفولت وأقل من 100 كيلوفولت. ويفترض الحل التقريبي للخط المتوسط أن مجمل تأثير التوازي يمكن جعله متجمعا عند نقاط مختارة على طول الخط. مثال على ذلك قد يمثل تأثير التوازي جميعه بموضع واحد عند منتصف الخط، وينتج عن هذا دائرة لها شكل الحرف T (تي) اللاتيني تسمى بدائرة T الرمزية Nominal، أنظر الشكل 2-1(أ). أو قد يؤخذ نصف قيمته عند بداية الخط والنصف الآخر عند نهايته حيث ينتج عن هذا دائرة تشبه الحرف اللاتيني π (باي) وتسمى دائرة π الرمزية، الشكل 2-1 (ب).

أما الخط الطويل فان طوله يكون أكبر من 150 كيلومتر وفولتيته أعلى من 100 كيلو فولت. ويتم تمثيله بدائرتي T و π كما في الخط المتوسط . وتعطي هاتان الدائرتان حلاً سريعاً



(ب) دائرة- π　　　　　　　　　(أ) دائرة- T

الشكل 2-1 تمثيل الخطوط المتوسطة والطويلة بدائرة T ودائرة π.

للخطوط الطويلة المتجانسة. وتستخدم كلمة الرمزي (Nominal) هنا للتأكيد على أن أسلوب الربط في كلتا الدائرتين يكون لهما ممانعة توالٍ كلية ومسامحة توازٍ كلية متوافقتان مع تلك التي للخط نفسه واللتان سوف يتم إيجادهما في الفصلين الثالث والرابع من هذا الكتاب بصيغ رياضية ملائمة ولو أنها تكون في بعض الأحيان معقدة جداً، إلا أنه في الوقت الحاضر تتيسر حواسيب الكترونية رقمية متطورة لغرض تنفيذ الحسابات الرياضية المعقدة في هذا المضمار. لذا فإنه قد يتم استخدام دائرة π واحدة أو أكثر مربوطة على التعاقب لتمثيل الخطوط الطويلة. كما أنه يجب الإشارة هنا إلى أن الافتراض الرئيسي الذي وضع في الحل التقريبي السريع للخط الطويل هو أن هذا الخط يجب أن يكون متجانساً، عليه فإن المعالم الرئيسية (ثوابت الخط) يمكن إعطاؤها لكل كيلو متر طول للخط نفسه، أي أن مقاومة الخط مثلا تعطى بالأوم / كيلومتر وكذلك تعطى المحاثة بالهنري / كيلومتر وهكذا.

إن التوجه الحديث في حل الدوائر الكهربائية هي تعميم الحل بحيث يشمل دوائر عدة : وهذا يعني إيجاد نظرية أو طريقة لها قدرة التطبيق على أنواع عديدة من الدوائر وليست مقصورة على حالة خاصة ، لذلك فان نظرية الشبكة ذات الأطراف الأربعة (أو الشبكة ذات المنفذين) مع ثوابتها المسماة ABCD، والتي ستناقش لاحقاً في هذا الفصل ، تعتبر مهمة جدا في تطبيقها على خطوط النقل بمختلف أنواعها (وغيرها من الدوائر الكهربائية الأخرى) .

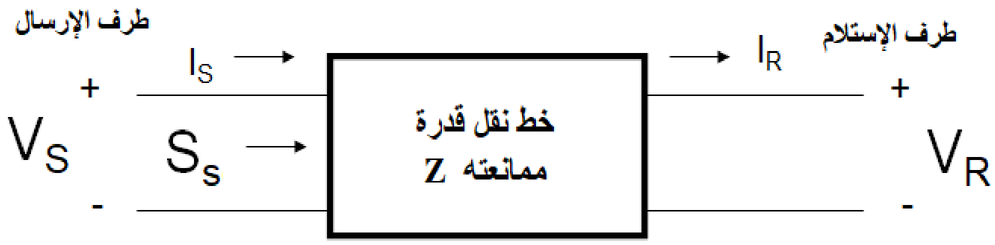
قد تحتوي منظومات النقل على خطوط علوية معلقة (هوائية) أو كيبلات أرضية أو تكون مزيجاً بين الاثنين وذلك لأن كثيراً من الخطوط قد تنتهي في نهايات كيبلات ، ولتجنب التكرار ،سوف يتم في هذا الفصل استخدام كلمة الخطوط فقط ، لكن النظريات التي سترد لاحقا تطبق بالتساوي على الكيبلات أيضا عندما يتم عمل التغييرات اللازمة للمعالم الأساسية (ثوابت

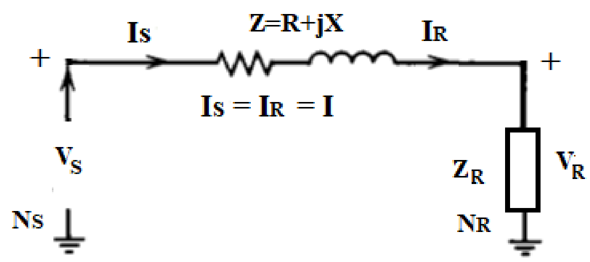
الخطوط) لهذه الكيبلات ، وتمتلك الكيبلات بصورة عامة ممانعة توالٍ منخفضة القيمة ومتسعة توازٍ عالية وتكون أطوالها اعتيادياً صغيرة لا تتجاوز بضع كيلومترات . ويجدر التذكير أنه في هذا المضمار سوف تتم دراسة نظرية خطوط نقل القدرة وهي تعمل تحت ظروف حالة مستقرة فقط.

4-2 تحليل أداء الخطوط القصيرة

Performance Analysis of Short Transmission Lines

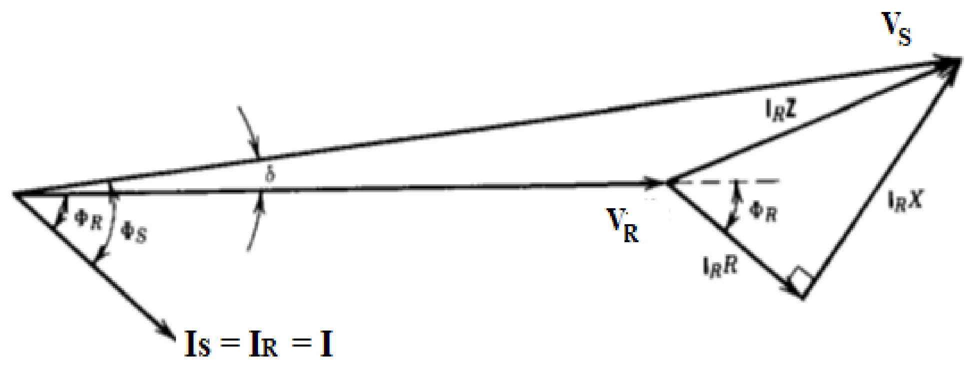
في جميع البلدان يوجد في أنظمة القدرة الكهربائية عدد كبير من خطوط النقل أطوال مساراتها تكون أقل من 50 كيلومتراً. لذا فإن كل خط واحد من هذه الخطوط سواء كان أحادي الطور أو ثلاثي الطور يمكن تمثيله بالتقريب بدائرة توالٍ مكافئة لطور واحد منه كما مبين في الشكل 2-2. كما يمكن أن تمثل هذه الدائرة نفسها مولد أو محول قدرة إذا تم اهمال دائرة الاثارة المغناطيسية لكليهما بحيث يمكن تطبيق نظرية الخط القصير على أجزاء واسعة من المعدات الكهربائية ضمن الشبكة الكبرى.





الشكل 2-2 تمثيل الخط القصير Short line بدائرة توالٍ مكافئة.

هذه الدائرة البسيطة لها مخطط طوري كما موضح في الشكل 2-3.



الشكل2-3 المخطط الطوري لدائرة خط قصير.

حيث أن :

ψ = زاوية ممانعة الخط: $\tan\psi = \frac{X}{R}$ ، $X = 2\pi fL$ ، $\cos\emptyset_R$ = عامل القدرة عند طرف الاستلام ، $\emptyset_s$ = زاوية مصدر القدرة و δ = زاوية الحمل.

ونذكر القارئ أن دائرة متوازنة ثلاثية الطور، ترتبط مع مصدر وحمل مربوطين كليهما بشكل نجمي يشبه الحرف Y بحيث يمكن أن تمثل بمخطط أحادي الطور (خط مفرد) كما موضحة في الشكل 2-2، وبما أن حاصل الجمع الطوري للتيارات في الخطوط الثلاثة يكون صفراً، فسوف لا يمر تيار بين نقطة محايد المصدر N_s ونقطة محايد الحمل N_R حتى لو كانتا مربوطتين سوية بسلك رابع. لذا فإنه لا يمكن أن يكون هناك فرق جهد بين النقطتين N_s و N_R. وللمحافظة على هذه الميزة في الدائرة الأحادية الطور فإن سلك موصل المحايد (الواصل بين النقطتين Ns و N_R) يجب إهمال قيمة ممانعته أو مقاومته في كل الأحوال. ويكون جهد النقطة N_s اعتيادياً مساويا لجهد الأرض (إلا خلال ظروف العطل المحتملة) وكذلك هو الحال للنقطة N_R.

في الدراسات التي سترد ضمن هذا الكتاب سوف نفرض أن جميع الأحمال على أنها متوازنة وثلاثية الطور ويقصد بالمتوازنة هو أن الأطوار الثلاثة تكون متساوية في المقدار وتكون الزوايا بينها 120 درجة، (إلا إذا ذكر خلاف ذلك). وعند التعامل مع الدوائر المتوازنة ثلاثية الطور سوف يفترض عادة أن قيم الفولتيات المعطاة جميعهاً تكون خط - إلى- خط (Line-to-Line)، وإن التيارات جميعاً هي التيارات التي تمر في الخطوط، وأن الفولت أمبير VAجميعهاً (قدرة وكذلك قدرة متفاعلة تكون للأطوار الثلاثة وليس لطور واحد) وأن عوامل القدرة جميعاً تكون عوامل القدرة للطور الواحد (أي جيب تمام الزاوية المحصورة بين فولتية الطور وتيار

الطور المناظر). كذلك فإن أجوبة الأمثلة ستكون معطاة في صيغة مماثلة كما ورد سابقاً، لكن في جميع الحسابات ينصح القارئ باستخدام الفولتية بين الطور والمحايد (في الربط النجمي)، وتيار الطور وممانعة الطور (حيث تعطى قيم الممانعات دائماً لكل طور).

لغرض إيجاد العلاقة بين فولتية طرف الارسال V_S وفولتية طرف الاستلام V_R فيجب استخدام قيم فولتية خط - إلى- محايد (لكل طور مربوط بشكل نجمي Y) لكل منهما ، ويساويان قيم خط - إلى - خط المناظرة مقسومة على $\sqrt{3}$.عليه فمن الشكل 2-3 وعندما تكون ظروف جهة الحمل معلومة فإن العلاقة بينهما يمكن أن تكتب بالأساليب الأتية :

الأسلوب الأول

$$V_s = ([(V_R \cos \emptyset_R + IR)^2 + (V_R \ \sin \emptyset_R + IX)^2] \,)^{\frac{1}{2}} \ \ \text{Volts} \qquad (2.1)$$

ويكون عامل القدرة لطرف الإرسال:

$$\cos(\emptyset_s) = \frac{V_R \ cos\emptyset_R + IR}{V_s} \qquad (2.2)$$

والذي منه يمكن إيجاد كفاءة النقل والمعلومات كافة عن طرف الارسال.

ويمكن إعادة رسم الشكل 2-3 كما في الشكل 2-4 وذلك لإيجاد فولتية الإرسال V_S باستخدام الجبر المركب (مقدار وزاوية) مع أخذ V_R بوصفه مطاوراً مرجعاً. لذلك يمكن أن تكتب V_S بالصيغة القطبية كما يأتي:

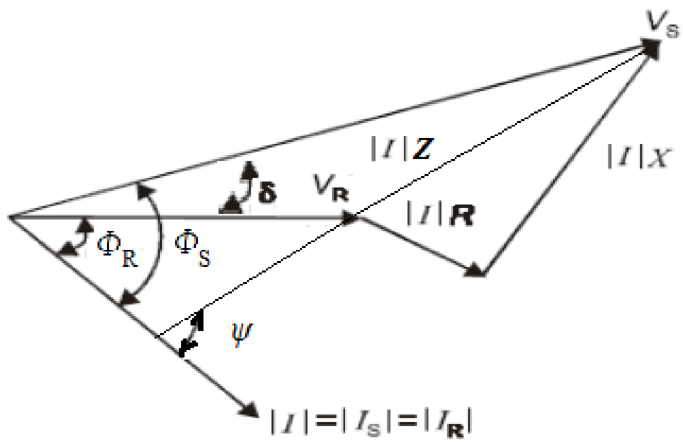
$$V_S = V_R + IZ \qquad (2.3)$$

$$= V_R\angle 0^\circ \ + I\angle(-\emptyset_R) \times Z\angle\psi$$

$$= V_R + IZ\angle \ (\psi - \emptyset_R)$$

صيغة قطبية : $= V_S\angle\emptyset_s - \emptyset_R = V_S\angle\delta$

حيث أن $\delta = \emptyset_s - \emptyset_R$



الشكل 2-4 مخطط طوري لخط قصير يبين المحل الهندسي لفولتية الإرسال V_S لتيار ثابت I عند حمل ذي عامل قدرة متغير.

إن فولتية الممانعة تعرف بأنها حاصل الضرب العددي IZ على فرض أن التيار I هو التيار المقتن، إلا إذا اعطيت كمية أخرى غيره ، عليه فإن فولتية الممانعة عند التيار المقتن تكون ثابتة لدائرة معلومة وهي غير معتمدة على عامل القدرة . وإذا تم تقسيم فولتية الممانعة على الفولتية المقننة (الأساس) فإنها تصبح ممانعة الدائرة بصيغة نسبة الوحدة المناظرة إلى القدرة المقننة مقدرة بالميكا فولت أمبير (MVA).

كما يعرف هبوط الفولتية على طول خط نقل بأنه الفرق العددي بين فولتية طرف الارسال وفولتية طرف الاستلام (V_S-V_R) على فرض أن التيار والفولتية يكونان بقيمهما المقننة عند طرف الاستلام ، إلا إذا ذكر خلاف ذلك ، عليه فان

$$\text{هبوط الفولتية} = V_S - V_R \quad \text{فولت} \qquad (2.4)$$

مما يجب توضيحه في الشكل 2-4 هو أن هبوط الفولتية يكون دالة لعامل القدرة. لذلك فإن عامل القدرة يجب أن يكون معلوماً. وإذا ما تم تقسيم هبوط الفولتية على الفولتية المقننة (الأساس) فإن النتيجة تكون بصيغة نسبة الوحدة وإذا ضرب ناتج القسمة هذا في 100 فإن النتيجة تكون بصيغة النسبة المئوية.

يعرف تنظيم الفولتية Voltage regulation الذاتي والملازم لخط ما بأنه الارتفاع الرقمي في فولتية طرف الاستلام عندما يتم فتح دائرة حمل معين تسحب تيار مقنن عند فولتية مقننة وعامل قدرة معلوم مع بقاء الفولتية الداخلة والتردد ثابتين (عليه فإن كلمة الملازم المذكورة

تعني أن الارتفاع بالفولتية يرجع للخط وحده وليس للمصدر المجهز للطاقة). بما أن فولتية طرف الاستلام لخط قصير في حالة اللاحمل هي $V_{Ro} = V_S$ ينتج من ذلك أن:

$$V_S - V_R = V_{Ro} - V_R = \text{تنظيم الفولتية} \qquad (2.5)$$

وبهذا يكون تنظيم الفولتية مساوياً لهبوط الفولتية، ويمكن أن يعطى التنظيم هذا بالفولت، أو بنظام نسبة الوحدة أو بالنسبة المئوية (واعتيادياً تستعمل النسبة المئوية لهذا الغرض). إن على القارئ أن يتأكد من أن التنظيم يكون أعلى ما يمكن عندما تكون قيمة الزاوية $\psi - \emptyset_R = 0$ وأن هذا التنظيم الاعظم يكون مساوياً لفولتية الممانعة. إضافة إلى ذلك فإن هناك عامل قدرة خاصاً (اعتيادياً يكون متقدماً) عنده يتساوى كل من V_R و V_S، أي عندما يكون التنظيم صفراً، وإذا هبط عامل قدرة الحمل إلى قيمة (متقدمة) أقل فهذا يعني أن V_R تكون أكبر من V_S وعليه يكون التنظيم سالب الاشارة. إذن فالتنظيم هو مقياس للتذبذب الذي يحدث عند أطراف التغذية للمستهلكين عندما يتذبذب الحمل على النظام بأكمله. وقد يتم الحصول على قيمة للتنظيم منخفضة بواسطة جعل ممانعة النظام قليلة ولغاية أطراف المستهلكين وعدم السماح لعامل القدرة بالهبوط إلى قيم منخفضة ومتأخرة.

وقد تم في بعض المراجع تبيان أن تنظيم الفولتية يعطى بالمعادلة (2.6) التالية:

$$\text{تنظيم الفولتية} \simeq IR\cos\emptyset_R + IX\sin\emptyset_R = IZ\cos(\psi - \emptyset_R) \ \text{فولت} \qquad (2.6)$$

وذلك لقيم متأخرة للزاوية $\emptyset_R$.

وبالتمعن في الشكل 2-3 يتبين أن تنظيم الفولتية لأي خط نقل يتناسب مع تيار الحمل (على القارئ أن لا يخلط هذه الملاحظة بالملاحظة السابقة وهي أن التنظيم يحسب عادة في التيار المقنن) وتكون المعادلة (2.6) معقولة من حيث الواقع لعوامل القدرة المتأخرة العادية ولكن يجب عدم استعمالها لعوامل القدرة المتقدمة، ويستخلص من (2.6) ان التنظيم يكون أقصى ما يمكن ويساوي IZ وذلك عندما تكون الزاوية ψ (المتأخرة) مساوية للزاوية $\emptyset_R$. ولمعظم خطوط النقل العملية، لا يستحب أن تزيد قيمة IZ عند الحمل المقنن عن 10% من الفولتية المقننة V_R وأن تكون زاوية الحمل δ بضع درجات فقط . ولو أن معظم المخططات الواردة في هذا الفصل تبين قيمة IZ وكذلك الزاوية δ بصورة مبالغ بها وذلك لغرض جعل هذه المخططات تظهر بصورة أوضح ليس إلا.

مثال محلول 2-1

خط قصير ثلاثي الطور، 33 كيلو فولت، يجهز حملاً مقداره 7 MW بعامل قدرة متأخر مقداره $cos\emptyset_R = 0.85$ وفولتية حمل 33 كيلو فولت. فإذا كانت ممانعة التوالي للخط تساوي j30+ 20 أوم / طور، فاحسب فولتية طرف الارسال وكذلك زاوية الحمل δ.

الحل:

نحسب الفولتية للطور الواحد وهي:

$$V_R = \left(\frac{33}{\sqrt{3}}\right)\angle 0° = 19.07\angle 0° \frac{kV}{\text{طور}}$$

∴ يكون التيار

$$I = \left(\frac{7 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 33000 \times 0.85}\right)(0.85 - j0.527)$$

$$= 144.1(0.85 - j0.527) = 122.3 - j75.9\text{A}$$

$$IZ = (122.3 - j7.9)(20 + j30) = 4723 + j2151 \quad \text{V/طور}$$

$$V_S = V_R + IZ = 23\,793 + j2151 = 23\,880\angle\, 5.18°\ \text{V /طور}$$

هذه قيمة الفولتية V_S للطور الواحد أما قيمة فولتية الخط فتضرب هذه الكمية بـ √3 لتكون:

$$V_S = 41.4\ \text{kV (خط)}$$

وزاوية الحمل δ= 5.18°

ويمكن حل هذا المثال بطريقة أخرى:

$$V_R cos\emptyset_R + IR = 19\,070 \times 0.85 + 144.1 \times 20 = 14\,353$$

$$V_R sin\emptyset_R + IX = 19\,070 \times 0.527 + 144.1 \times 30 = 14\,353$$

$$V_S = \sqrt{(19.08^2 + 14.35^2)} = 23.88\ \frac{\text{kV}}{\text{طور}}$$

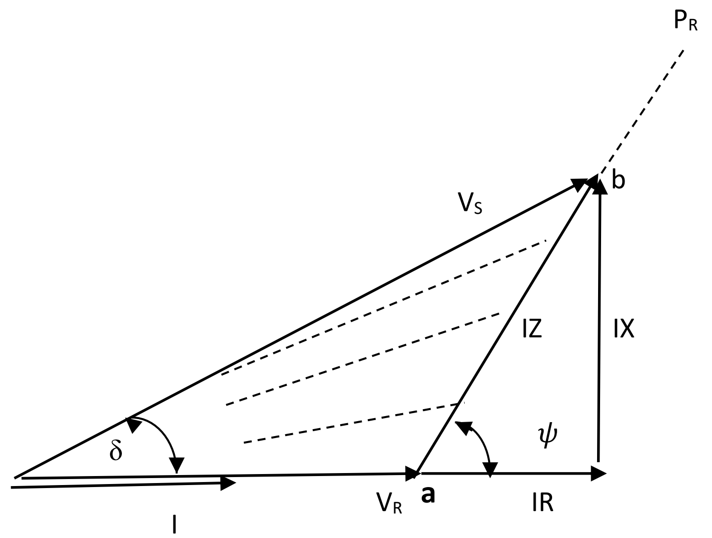
$$= 41.4\ \text{kV(خط)}$$

$$\emptyset_s = \emptyset_R + \delta = tan^{-1}\left(\frac{14.35}{19.08}\right) = 36.98°$$

$$\delta = \emptyset_S - \emptyset_R = 36.98 - 31.8 = 5.18°$$

5-2 دراسة أداء الخط القصير بالطرق البيانية

في هذه الفقرة سوف نتطرق إلى عرض ومناقشة طريقة بيانية لدراسة خط نقل قصير. في البداية سنستعرض شكل المخططات في طرف الاستلام التي تفرض أن فولتية الخط تكون ثابتة عند النهاية البعيدة وممانعته ثابتة أيضاً حيث يبين الشكل 2-5 المخطط الطوري لخط قصير يجهز قدرة معينة بفولتية ثابتة مقاسة عند طرف الاستلام للخط بعامل قدرة مقداره واحد. في حالة اللاحمل سوف تنطبق الفولتيتان V_S و V_R مع بعضهما لعدم وجود فرق في الطور بينهما. وإذا ازداد الحمل بكميات صغيرة متساوية فإن طرف المطاور V_S سوف يتحرك على طول ab بكميات صغيرة متساوية. يشار إلى الخط ab بأنه محور القدرة إذا ما أمكن تقسيمه بوحدات القدرة المجهزة P_R (بالميكاواط MW) . إن محور القدرة هذا يتقدم على V_R بزاوية ثابتة ψ .



الشكل 2-5 خط قصير عليه حمل ذو عامل قدرة = 1 وبفرض أن الفولتية V_R ثابتة .

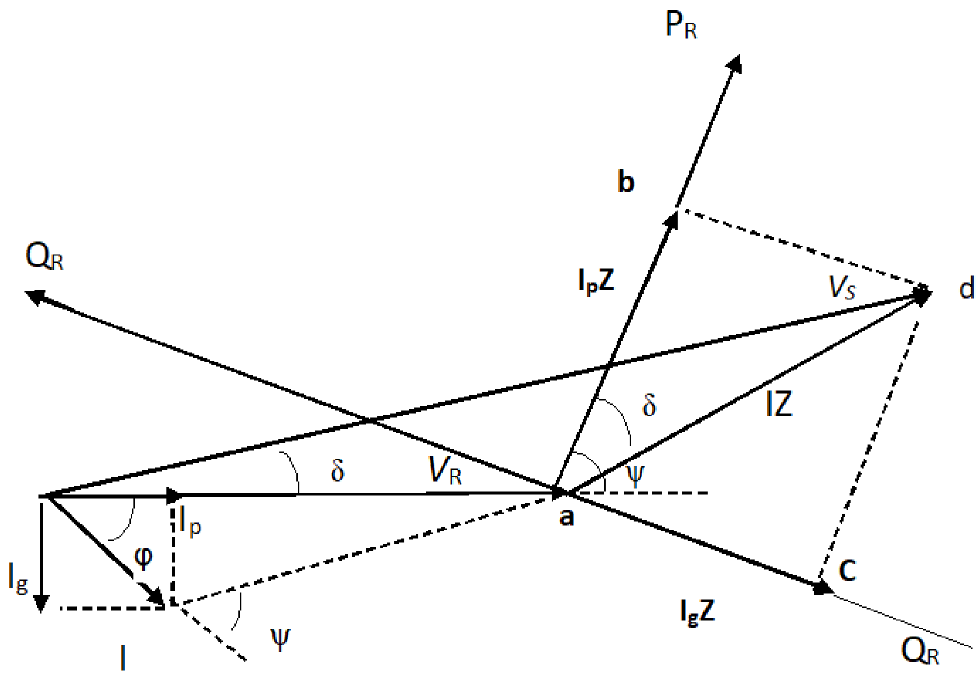
وإذا تغير عامل القدرة نحو الصفر (متأخراً)، فإن I و IZ سوف يتحركان كلاهما بزاوية مقدارها 90^o باتجاه عقرب الساعة من مواضعهما المبينة في الشكل 2-5. وإذا ما تزايد التيار أيضاً بالزيادات الصغيرة المتساوية نفسها كالسابق، فسوف يتحرك طرف المطاور V_S بخط مستقيم عمودياً على محور القدرة وبزيادات صغيرة متساوية وكل منها يساوي تلك التي على طول

محور القدرة. وهذا المحور الجديد يسمى محور القدرة المتفاعلة (Q_R) (الـ var أو الفولت أمبير المتفاعلة)، حيث يكون مقياسه بالميكافولت أمبير المتفاعلة MVAr المتأخرة.

كذلك يوضح الشكل 6-2 مخططا لطرف الاستلام لحالة عامة يكون فيها الحمل ذي عامل قدرة متأخر $cos\emptyset_R$. هذا المخطط يمكن الحصول عليه بطريقة مراكبة القدرة الفعالة P والقدرة المتفاعلة Q بحيث يوضع مقياس الميكاواط MW على المحور ab، و مقياس الميكافار $MVAr$ المتأخرة على المحور ac وللميكافولت أمبير MVA على المحور ad بحيث تكون جميع المقاييس متساوية عددياً. وبما أن V_R وكذلك Z يكونان ثابتين عليه فإن الحمل بالفولت أمبير VA على الطور الواحد يتناسب طرديا مع الكميات التالية:

$$[VA\text{الحمل}/\text{طور}] \propto IZ \propto I \propto V_R I$$

وهذه الحجة تكون صحيحة أيضاً لمركبتي تيار الحمل I_g و I_p الموضحتين في الشكل 6-2 نفسه.

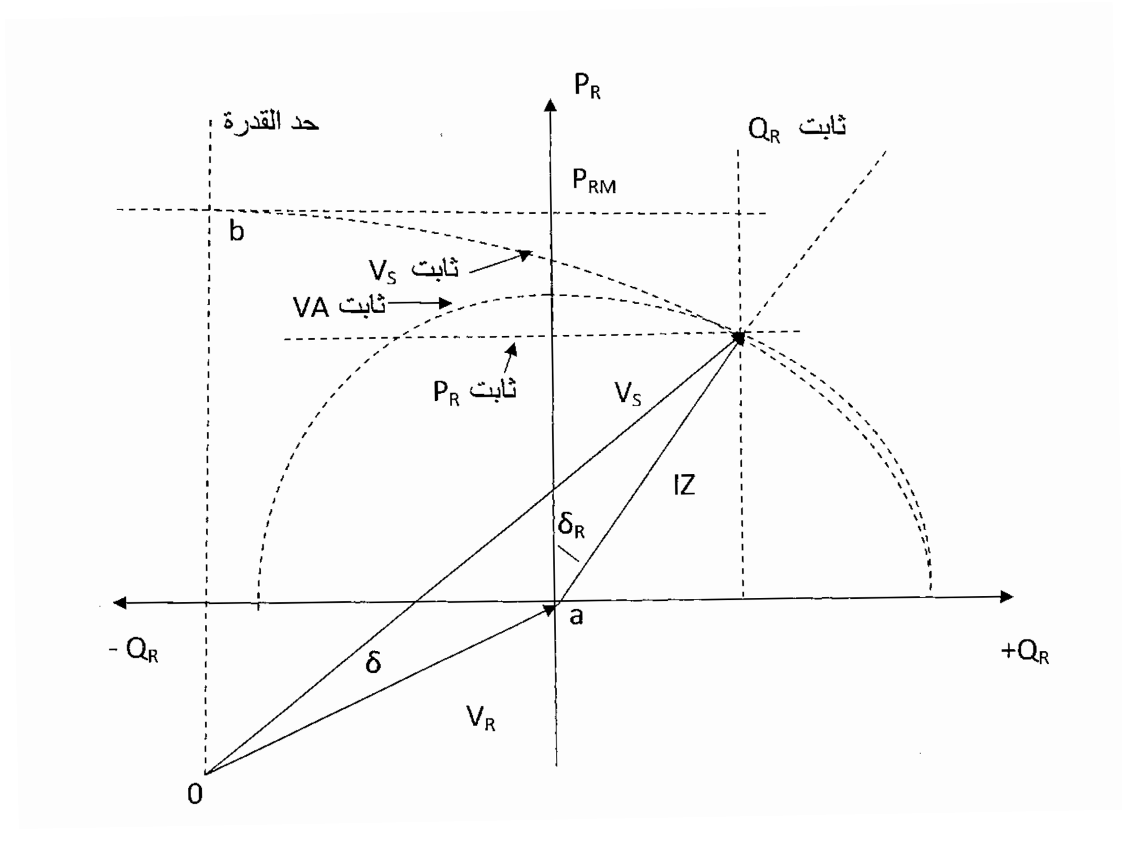


الشكل 6-2 مخطط لطرف الاستلام لخط قصير فيه V_R ثابتة ، P_R هي القدرة الحقيقية للحمل بالواط و Q_R هي القدرة المتفاعلة للحمل بالفار Var .

كذلك يعطي الشكل 2- 6 مخططا لأداء طرف الاستلام لخط قصير حيث يوضح المحال الهندسية للفولتية V_S لظروف اشتغال متغيرة ومتعددة تكون الفولتية V_R فيها ثابتة في جميع الحالات.

تأمل الآن حملاً معين يستهلك قدرة ثابتة بعامل قدرة متغير، فعندما تكون عوامل القدرة متأخرة ومنخفضة القيمة تكون $V_S > V_R$ ، بينما في حالة كون عوامل القدرة متقدمة ومنخفضة قد يكون V_S أقل من V_R وهناك عامل قدرة متقدم معين تكون فيه $V_S = V_R$. كذلك يعطي المخطط قيمة V_R المطلوبة لحمل معين تفي بالطلب عند طرف الاستلام للخط.

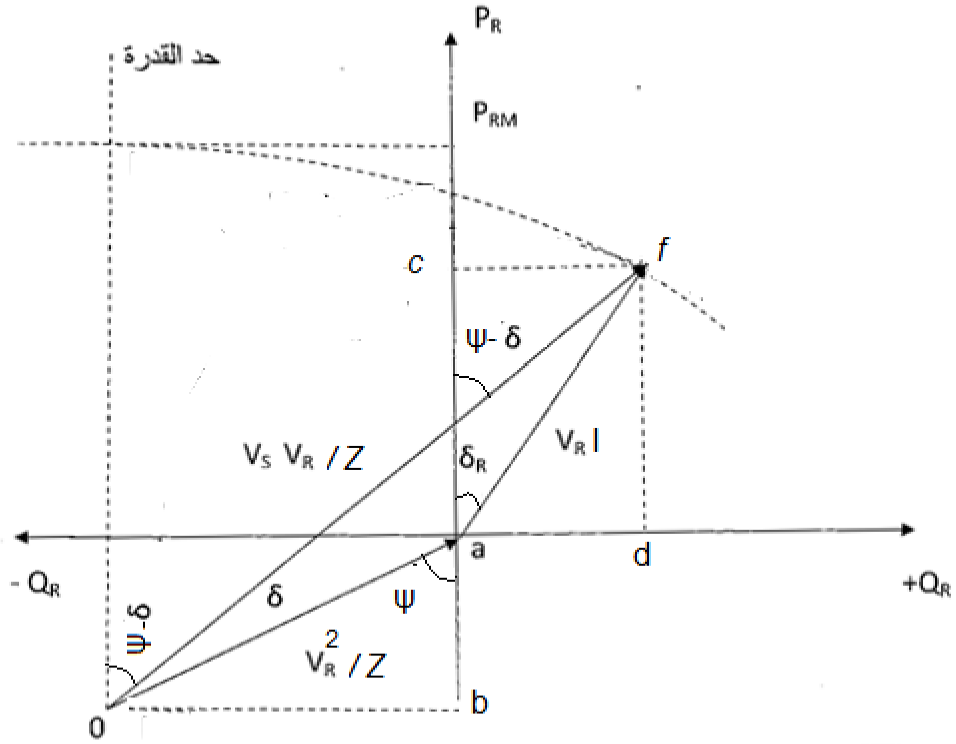
في بعض الاحيان من المفضل رسم مخططات الأداء بمقياس الفولت أمبير VA وليس بمقياس الفولتية المشار إليه سلفاً، ففي الشكل 2-7 يتناسب IZ مع فولت أمبير الحمل حيث يكون V_R و Z كليهما ثابتاً. ويمكن تغيير التناسبية هذه إلى مساواة وذلك بضرب IZ وكل من V_R و V_s كذلك بالقيمة V_R/Z كما هو واضح في الشكل 2-7 المذكور.



الشكل 2-7 المحال الهندسية لفولتية طرف الإرسال V_S لخط قصير عندما تكون فولتية طرف الاستلام VR ثابتة.

بما أن كلا من $V_R V_S/Z$ و V_R^2/Z لهما وحدات الفولت أمبير. فإن المخطط بأكمله يمكن رسمه بمقياس الفولت أمبير نفسه. ومما يجب ملاحظته هو أن الشكل 2-8 يحتوي على كميات مركبة Complex quantities (متجهات) وليس مطاورات Phasors. ويجب التفريق بين المتجه والمطاور، حيث أن كل مطاور هو متجه ولكن ليس كل متجه هو مطاور إلا إذا تغير المتجه بقيمته مع الزمن فيصبح حينئذ مطاوراً؛ (راجع الفصل الأول) .

الآن إذا تم ضرب كل متجه من المتجهات الثلاثة في الشكل 2-8 بالرقم 3 (وهذا يعني ضرب المقياس نفسه في 3)، فإن *af* سوف يمثل الفولت أمبير لحمل ثلاثي الطور، ويتم الحصول على هذه النتيجة تلقائيا فيما لو استخدمت قيم خط - إلى - خط لكل من V_s و V_R بدلاً من قيم خط - إلى- محايد.



الشكل 2-8 مخطط أداء لخط قصير يبين حالاته عند حدود القدرة.

إن ايجاد *af* في الشكل 2-8 يتم من معرفة قيمة *IZ* ، عليه فاذا ضرب التيار *I* بأي رقم مختار وليكن *K* وقسمنا *Z* على *K* نفسه (وهذا يعني تقسيم مسار الطور على *R*) فإن *af* لا يتغير لأن *af* ثابت لا يعتمد على قيمة *K* ، لذا فإن *af* يمكن أن يمثل حاصل ضرب فولت أمبير الحمل على طول الخط مع الأخذ بعين الاعتبار تناسب كل منهما عكسياً مع الآخر. وعمليا قد

ترسم مخططات أداء الخطوط بمقياس ميكا فولت أمبير – كيلومتر (*MVA-km*) للاطوار الثلاثة. عليه فإذا كانت af في مثل هذه المخططات تساوي 200 ميكا فولت أمبير – كيلومتر، معناها أن 10 ميكا فولت أمبير من القدرة تجهز من خط طوله 20 كيلومتر. وترسم المخططات لفولتية معينة ولنوع معين من أنواع الخطوط ولكنها لا تعتمد أساساً على مسار الطول لهذه الخطوط. ولتوخي الفائدة ترسم مثل هذه المخططات عادة بجعل المحور السيني الموجب ($+x$) محور القدرة والمحور الصادي الموجب ($+y$) محور القدرة المتفاعلة (*vars*)، ومما يجب ملاحظته أن مثل هذه المخططات سوف تبين زيادة زاوية القدرة δ باتجاه عقرب الساعة وهذا عكس ما هو متعارف عليه اعتيادياً.

ويمكن رسم مخططات الاداء على أساس ثبوت فولتية طرف الارسال، وتدعى هذه المخططات بمخططات طرف الارسال. أما رسمها فيترك إلى القارئ تمريناً على هذا الموضوع.

6-2 قوانين القدرة: حد القدرة في الحالة المستقرة

POWER FORMULAE: STEADY-STATE POWER LIMIT

من الشكل 2-8، تكون القدرة المجهزة إلى طرف الاستلام للخط الذي ممانعته Z هي كالآتي:

$$P_R = \overline{ac} = \overline{bc} - \overline{ba}$$

$$= \left(\frac{V_S V_R}{Z}\right)\cos(\psi - \delta) - \left(\frac{V_R^2}{Z}\right)cos\delta \qquad (2.8)$$

بالأسلوب نفسه فإن القدرة المتفاعلة المجهزة Q_R تكون:

$$Q_R = \left(\frac{V_S V_R}{Z}\right)\sin(\psi - \delta) - \left(\frac{V_R^2}{Z}\right)sin\psi \qquad (2.9)$$

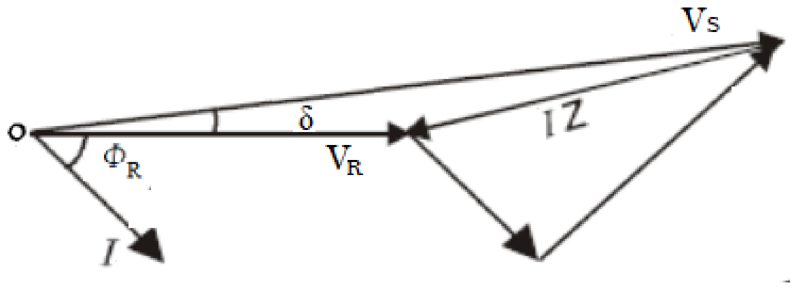
إذا كان كل من V_S و V_R قيم الفولتية خط - إلى- محايد (للربط النجمي) فإن P_R وكذلك Q_R تكون قيمتاهما لكل طور أيضاً. وإذا ضربت كل من P_R وكذلك Q_R بالرقم 3، فإن المعادلات الناتجة تعطي قدرة الأطوار الثلاثة وكذلك القدرة المتفاعلة المجهزة لحمل ثلاثي الطور متوازن .

وفي الشكل 2- 9 إذا أخذنا المطاور V_R كونه مطاوراً مرجعاً فإن :

$$V_R = V_R\angle 0°$$

$$V_S = V_R + IZ$$

$$I = \frac{V_s}{Z} - \frac{V_R}{Z} = \frac{V_s}{Z}\angle\delta - \psi - \frac{V_R}{Z}\angle - \psi$$



الشكل 2-9.

ويكون مترافق التيار I^* :

$$I^* = \frac{V_s}{Z}\angle(-\delta + \psi) - \frac{V_R}{Z}\angle(\psi)$$

والفولت- أمبير المجهزة إلى الحمل تكون:

$$S_R = V_R I^*$$

$$= \left(\frac{V_s V_R}{Z}\right)\angle(-\delta + \psi) - \frac{V_R^2}{Z}\angle\ \psi \qquad (2.10)$$

$$= P_R + jQ_R$$

حيث أن P_R هي القدرة الحقيقية و Q_R هي القدرة المتفاعلة وتكونان عموديتان على بعضهما لتكون محصلتهما S_R في مثلث القدرة كما هو معروف وكلاهما معطى في المعادلتين (2.8) و (2.9) السالفتين. هذه المعادلات مفيدة عند عدم معرفة تيار الخط (وخلافاً لهذا فأنه يجب استخدام المعادلات (2.1) و (2.2) وكذلك (2.3))، فمثلاً إذا اعطيت قيمة كل من P ، V_S ، V_R وكذلك Z فإن المعادلة (2.8) سوف تعطي قيمة δ التي بدورها تعوض في (2.9) لتعطي القدرة المتفاعلة Q_R.

ويوضح الشكل 2-8 أن المسار الهندسي للكمية $V_S V_R/ Z$ يكون ثابتاً (أي أن الفولتية V_S ثابتة) وعليه سيكون المسار الهندسي لها عبارة عن دائرة. ومعادلة هذه الدائرة يمكن إيجادها وذلك بحذف δ بين المعادلتين (2.8) و(2.9) مع استخدام العلاقة التالية:

$$cos^2(\psi - \delta) + sin^2(\psi - \delta) = 1$$

عليه فإن

$$\left[P_R + \left(\frac{V_R^2}{Z}\right)cos\psi\right]^2 + \left[Q_R + \left(\frac{V_R^2}{Z}\right)sin\psi\right]^2 = \left(\frac{V_s V_R}{Z}\right)^2 \qquad (2.11)$$

وهذه عبارة عن معادلة دائرة إذا كانت كل من P_R و Q_R متغيرتان

إذا اشتغل خط قصير بفولتية ثابتة عند نهايته فإن هناك حد أعلى للقدرة يتمكن هذا الخط من تجهيزه. وقد تمت الإشارة لذلك عندما تمت مناقشة الشكل 2-8. هذا الاستنتاج يمكن استخلاصه من المعادلة (2.8). فإذا كانت P_R دالة للزاوية δ فقط (بحيث تكون جميع المعالم الأخرى ثابتة) فإن قيمة P_R تكون أعظم ما يمكن عندما تكون $\psi = \delta$ ومقدار هذه القيمة العظمى تعطى كالآتي:

$$P_{RM} = \left(\frac{V_s V_R}{Z}\right) - \left(\frac{V_R^2}{Z}\right)cos\psi \ = (V_s V_R/Z) - (V_R^2 R)/Z^2 \qquad (2.12)$$

إن هذه العلاقة تحدد المعالم أو الثوابت التي يعتمد عليها حد القدرة لخط ما، وإذا كانت المقاومة تساوي صفراً ($R = 0$) فإن الحد الثاني من المعادلة (2.12) يكون صفراً. أما إذا كانت قيمة الممانعة تساوي نسبة معينة من قيمة المقاومة، أي أن: $Z = KR$ وكذلك $V_S = V_R$ فإن حدي المعادلة (2.12) يكونان بنسبة $1/K : 1$. وتتغير قيمة K من 1 للخطوط ذات فولتية 400 كيلو فولت خفيفة الحمل إلى حوالي 8 للخطوط التي يكون الحمل عليها ثقيل . عليه إذا كانت $V_R = V_S$ فإن:

$$P_{RM} = \left(\frac{V_R^2}{Z}\right)(1 - cos\psi) = \left(\frac{V_R}{Z}\right)^2 (Z - R) \qquad (2.13)$$

يلاحظ من المعادلتين (2.12) و (2.13) أنه إذا ارتفعت الفولتيتان V_S و V_R بمقدار 10% فإن حد القدرة سيرتفع بمقدار 20% . وعند حصول حالة حد القدرة فإن القدرة المتفاعلة المجهزة إلى الحمل تعطى كالآتي:

$$Q_R = -\left(\frac{V_R^2}{Z}\right) sin\psi \qquad (2.14)$$

وتكون بذلك غير معتمدة على V_S (انظر الشكل2-8)، أما الإشارة السالبة فتدل على أن الحمل يعمل على امتصاص القدرة المتفاعلة الـ (vars) المتقدمة نفسها (تذهب إلى ناحية الحمل) أو أنه (أي الحمل) يكون مصدر للقدرة المتفاعلة المتأخرة (تذهب من ناحية الحمل إلى المصدر). وباستخدام الشكل 2-9 يمكن أن نشتق معادلة للقدرة الفعالة P_S ومعادلة للقدرة المتفاعلة Q_S لطرف الإرسال حيث نجد أن :

$$P_s = \left(\frac{V_s^2}{Z}\right) \cos\psi - \left(\frac{V_s V_R}{Z}\right) \cos(\psi + \delta) \qquad (2.15)$$

$$Q_s = \left(\frac{V_s^2}{Z}\right) \sin\psi - \left(\frac{V_s V_R}{Z}\right) \sin(\psi + \delta) \qquad (2.16)$$

وإذا كانت P_S دالة للزاوية δ فقط، فإنها تكون أعظم ما يمكن عندما تصبح $(\psi+\delta)=180^o$، وبما أن القيمة النموذجية للزاوية ψ هي حوالي 60^o، عليه تكون القيمة المقابلة للزاوية δ حوالي 120^o (V_S تتقدم على V_R) لذلك تكون القيمة العظمى للقدرة الداخلة:

$$P_{SM} = \left(\frac{V_s^2}{Z}\right) cos\psi + \left(\frac{V_s V_R}{Z}\right) = \frac{V_s^2 R}{Z^2} + \frac{V_s V_R}{Z} \qquad (2.17)$$

وإذا كانت $V_R=V_S$ فان

$$P_{SM} = \left(\frac{V_s}{Z}\right)^2 (R + Z) \qquad (2.18)$$

والقدرة المتفاعلة المقابلة لأعظم قدرة فعالة داخلة ستكون:

$$Q_s = \left(\frac{V_s^2}{Z}\right) sin\psi \qquad (2.19)$$

وتكون موجبة الإشارة وغير معتمدة على V_R.

7-2 السيطرة على فولتية خط شعاعي

VOLTAGE CONTROL OF A RADINAL LINE

هناك متطلب قانوني يقضي بأن الفولتية عند طرف المستهلك يجب أن لا تتغير بنسبة أكثر من ±6% من القيمة المعلنة. كذلك فمن المحبذ أن الفولتية عند قضبان التوزيع في محطات التوليد والمحطات الثانوية يجب أن لا تتغير أكثر من ±10% حتى تعمل جميع الاجهزة والمعدات الثانوية الأخرى في المحطات بصورة مرضية عند فولتياتها المقننة أو قربها بحيث لا تجهد عوازلها بسبب الفولتية الزائدة. إن الأسباب الرئيسية لهبوط الفولتية على طول الخطوط هي ممانعة الخط نفسه وكذلك الحمل ذو عامل القدرة المتأخر (هذا الأخير ناتج عن تيارات المغنطة التي يسحبها الحمل نفسه).

يمكن تقليل مقاومة الخط بنصب خط أكثر ثقلاً (استخدام مقطع عرضي أكبر للموصلات النحاسية المستخدمة) لكن هذا يضيف إلى الكلفة الكلية للخط بحيث يكون هناك حد اقتصادي لهذه الطريقة التي تقلل من هبوط الفولتية. إن مفاعلة التوالي للخط تتناسب مع المحاثة الذاتية للموصل والتي تقل كلما قلت المسافة بين الموصلات نفسها، (انظر الفصل الثالث)، لكن يجب أن لا تكون المسافة قليلة بحيث يحصل شرر عرضي (flashover) بينها عندما تتأرجح (تتراقص) خلال ظروف طقس رديئة تهب فيها رياح شديدة.

ويتم تشجيع المستهلكين على رفع عوامل القدرة المتأخرة في منشآتهم بحيث تقارب قيمة الواحد وذلك بحساب استهلاكهم على تعريفه عالية لعامل القدرة المنخفض (وتكون عادة بقياس الـ kVA للطلب الأعظم). أما كلفة نصب أجهزة تحسين عامل القدرة وصيانتها فتسوغ مقابل التخفيض في احتساب الطاقة الكهربائية المصروفة.

وتعد المتسعات (المكثفات) الستاتيكية المربوطة على التوازي مع الحمل (ربطاً نجمياً أو مثلثياً) طريقة مشاعة لتحسين عامل قدرة الحمل الكلي. إن متسعة Capacitor ما تعد مصباً للقدرة المتفاعلة الـ vars المتقدمة وعليه تكون مصدراً لـ vars المتأخرة التي تجهز إلى الحمل وبذلك تقلل الـ vars المتأخرة المأخوذة من المصدر. وتستخدم مرحلات حساسة للفولتية للسيطرة بالتدريج على قيمة المتسعات الداخلة في الدائرة وذلك لإبقاء V_R ثابتة تقريباً لقيمة ثابتة من قيم V_S. وإذا استخدمت قيمة ثابتة للمتسعة فينبغي أن يلاحظ أنه في حالة الحمل الخفيف قد ترتفع V_R إلى قيمة عالية وتكون أكبر من قيمة (V_S) .

أما إذا كان الحمل محركات كهربائية صناعية كبيرة، فإن تحسين عامل القدرة الكلي يمكن أن ينفذ باستخدام محركات تزامنية Synchronous motors بوصفها جزءاً من الأجهزة المنصوبة فعندما تكون الإثارة المغناطيسية لهذه المحركات عالية فإنها تتصرف كمتسعات؛ إذ تأخذ تياراً من المصدر بعامل قدرة متقدم. في هذا المضمار يشار إلى المحركات التزامنية بالمعوضات التزامنية (متسعات تزامنية أو معدلات الطور التزامنية).

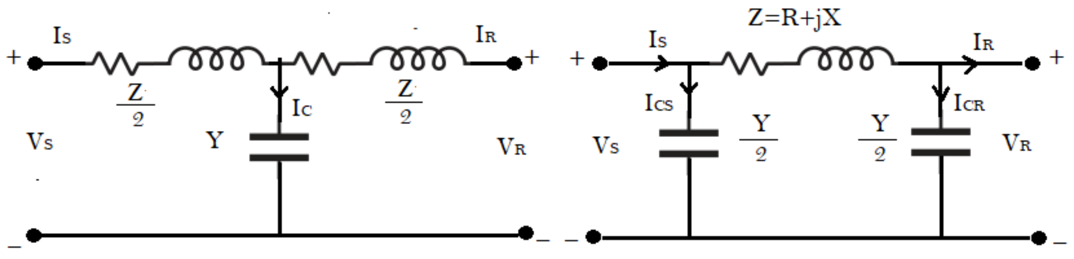
توجد في معظم خطوط النقل محولات ذات مآخذ متغيرة Tap changers تغير الفولتية حتى في حالة الحمل وتكون أما عند طرف واحد من الخط أو عند طرفيه. وتعطي هذه المآخذ تحكم بقيمة الفولتية الخارجة من المحولات. وتعمل آلية تشغيل تغيير المأخذ بواسطة مرحل حساس للفولتية يكشف أي تغير في فولتية النظام. ويتم تأخير زمن اشتغال المرحل لمنعه من التشطط مع أي تغيرات عابرة للفولتية غير مرغوب فيها.

8-2 الخطوط المتوسطة والطويلة Medium and Long Lines

تتراوح أطوال خطوط النقل المتوسطة بين 80 إلى 240 كيلومتر وكانت تسمى في السابق بالخطوط الطويلة أيضاً. ولما كان تمثيل الخطوط القصيرة للنقل يهمل بصورة عامة تأثير دوائر المقاومة والمتسعة المربوطة على التوازي التي تم شرحها في الفقرة 2-2، وتعامل أجهزة تحسين عامل القدرة كأنها جزءاً من الحمل فإن تمثيل خطوط النقل المتوسطة يأخذ بعين الاعتبار دوائر التوازي هذه والتي يعبر عنها بالمسامحة Admittance (بدلاً من ممانعة) وذلك لكونها تتناسب مع طول الخط، لذا فان قيمتها تعطى بالسيمنس لكل كيلومتر. ويتم تمثيل الخطوط المتوسطة بدائرة π أو بدائرة **T** الرمزيتان وكما سيتم شرحهما في الفقرة التالية.

1-8-2 دوائر π و T الرمزية NOMINAL π AND T CIRCUTS

في الدوائر الرمزية توضع مسامحات التوازي في نقاط معينة على مسار الخط وذلك لتمييزها كون أن توزيعها يكون بصورة منتظمة على طول الخط في صيغة الحرف π (pi) اللاتيني بحيث توضع نصف المسامحة في النهاية الأولى ونصفها في النهاية الثانية كما هو موضح في الشكل 2- 10 (أ). أما في صيغة دائرة T (tee) فتركز المسامحة في منتصف الخط بينما يتم تجزئة الممانعة إلى قسمين متساويين كما هو مبين في الشكل 2-10 (ب). إن هذه التمثيلات تعطي حلول تقريبية لكنها مفيدة وتعطي دقة كافية لكثير من الحالات العملية.



(ب) (أ)

الشكل 2-10 تمثيل الخط الطويل: (أ) دائرة π الرمزية ، (ب) دائرة T الرمزية .

وتكون لمتسعة الخط تأثيراً رئيسيا كونها مربوطة على التوازي، وهذه المتسعة سوف تأخذ تياراً يتقدم بزاوية 90^{o} على الفولتية المسلطة عليها، ويمكن عمل سماح لأي مفاقيد في القدرة في تفرعات التوازي للخط بسبب التسرب على سطوح العوازل تحت الظروف الرديئة للطقس والقدرة المفقودة نتيجة ظاهرة الهالة في الجو (انظر الفصل الرابع). هذه المفاقيد يمكن جمعهما معاً ويعاملان على أنهما مقاومة توازٍ لها توصيلية G تساوي معكوس مقاومة التوازي، لذا فأن مسامحة دائرة التوازي المتفرعة تعطى كالآتي:

$$Y = G + j\,2\pi fC$$

ويحسب تيار التوازي المناظر كالآتي:

$$I = VY + VG + jV2\pi fC$$

ويكون تيار التوازي (الفرع) مساوياً لمجموع تيارين أحدهما بالطور نفسه مع الفولتية والآخر يسبقها بزاوية 90^{o}. وإذا تم أهمال التسرب وظاهرة الهالة فإن مقاومة التوازي تكون قيمتها ما لانهاية وعليه تكون $G = O$. أما المتسعة C فهي متسعة الخط لكل طور إلى المحايد، وتحتسب من الأبعاد الفيزيائية للخط (انظر الفصل الرابع) عليه تكون دائرة التوازي هي دائرة نجمية (على شكل حرف Y) مكافئة باستخدام قيم خط - إلى - محايد .

الآن إذا رسم المخطط الطوري لخط ممثل بصيغة π الرمزية، فسوف يتضح أن تأثير متسعة التوازي في نهاية حمل الخط تعطي صيغة من صيغ تحسين عامل القدرة حيث أنه يقلل قيمة V_S عن قيمة معلومة من V_R إذا ما قورن بالخط القصير المماثل له. أما ممانعة التوالي للخط للطور الواحد فتكون:

$$Z = R + j\,X = R + j2\pi fL = Z \angle \psi \quad \frac{\Omega}{\text{طور}}$$

حيث R هي مقاومة الموصل وتستخرج عادة من جداول خاصة تأخذ بعين الاعتبار تأثيرات درجة حرارة التشغيل وصناعة الموصل إن كان مجدولاً وتأثير القشرة للموصل عند تردد 50 هرتز، أما L فهي المحاثة لكل طور وتحتسب من الأبعاد الفيزيائية للخط أيضاً، (انظر الفصل الثالث). من الأهمية بمكان ملاحظة أن معادلات الفولتية والتيار المراد اشتقاقها للخطوط الرمزية تطبق فقط للقيم في أطراف الخط ولا تعطي أية دلالة لقيم أخرى عند أية نقطة على طول الخط نفسه.

إن دائرة π الرمزية المعطاة في الشكل 2- 10 (أ) يتم تحليلها الآن بفرض أن V_R و I_R معلومتان، حيث ينتج عن تحليلها ما يأتي :

$$I_{CR} = \frac{V_R Y}{2}$$

$$I = I_R + I_{CR}$$

$$V_s = V_R + IZ$$

$$= V_R + \left(I_R + \frac{V_R Y}{2}\right) Z \tag{2.20}$$

$$= \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_R + Z I_R$$

$$I_{CS} = \frac{V_s Y}{2}$$

$$I_s = I + I_{CS}$$

$$= I_R + \frac{V_R Y}{2} + \frac{\left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_R Y}{2} + \frac{Z I_R Y}{2}$$

$$= Y\left(1 + \frac{YZ}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) I_R$$

على القارئ الآن أن يحلل دائرة T الرمزية المعطاة في الشكل 2- 10 (ب) ويبين :

$$V_s = \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) V_R + Z\left(1 + \frac{YZ}{4}\right) I_R \qquad (2.21 - \text{أ})$$

$$I_s = YV_R + \left(1 + \frac{YZ}{2}\right) I_R \qquad (2.21 - ب)$$

وتجدر الإشارة إلى أن دوائر π و T الرمزية لا تكون متكافئة ولا مكافئة للخط الحقيقي، وإنما هي تمثيل تقريبي لخط حقيقي معين.

لقد تم في الفقرة 2-4 تعريف " هبوط الفولتية " وكذلك " تنظيم الفولتية الملازم" وبيان أن هاتين القيمتين تكونان متساويتين في الخط القصير. لكن هذه المساواة لا تطبق في حالة الخطوط الطويلة لأن الفولتية عند طرف الحمل للخط لا تبقى مساوية لفولتية طرف الإرسال في ظروف اللاحمل. أما الفرق بينهما فيكون بسبب تيار شحن الخط الذي يسري في ممانعة التوازي للخط نفسه. أما ازدياد الفولتية من طرف الإرسال باتجاه طرف الحمل تحت ظروف اللاحمل (وتسمى بتأثير فرنتي Ferranti نسبة للعالم فرنتي)، فتظهر بوضوح في حالة الخطوط الطويلة جداً ذات الفولتية العالية. ومع أن الخطوط الإسمية أو الرمزية تكمن أهميتها الرئيسية في النواحي الاكاديمية ففي أغلب الأحيان تستخدم صيغة π الرمزية لتمثيل الخطوط المتوسطة والطويلة خلال عمليات تحليل الأنظمة باستخدام الحاسبات الرقمية.

2-8-2 الخط الطويل المتجانس UNIFORM LONG LINE

في تمثيلات π و T لخط نقل متوسط معين، تم فرض أن المعالم الأساسية للخط من مقاومة ومحاثة وكذلك متسعة باعتبارها جميعها متضامه أو مجتمعة في نقاط معينة على طول الخط وتكون جميعها ثابتة القيمة، أما في التحليلات المضبوطة فتكون هذه المعالم (الثوابت) مفروضة على أساس أنها موزعة بانتظام على طول الخط الكلي، وعليه تعطى قيمها عادة لكل كيلومتر طول. وكما في التمثيلات الرمزية للخط فتحسب قيم الممانعة والمتسعة أيضا من الأبعاد الفيزيائية للخط باستخدام المعادلات المعطاة في الفصلين الثالث والرابع.

يعد الخط الذي طوله أكثر من 240 كيلومتر في التصنيف الحديث خطا طويلاً. ويستخدم تمثيل الخط المتجانس للخطوط الطويلة جداً ذات الفولتية العالية كونها تعطي تمثيلاً مضبوطاً أكثر صحة من صيغة دمج المعالم (ثوابت الخط) ، لكن يجب أن يلاحظ أنه بسبب تدلي الأسلاك الحاصل بين ابراج النقل (انظر الفصل السادس) فانه يكون هناك بعض الشك في صحة هذا التمثيل من حيث طول الخط وارتفاعه عن الأرض اللذان يؤثران على حساب المحاثة L والمتسعة C. عليه فان التحليلات الرياضية التي سترد لاحقا سوف تعطي استجابة وتعامل الخط

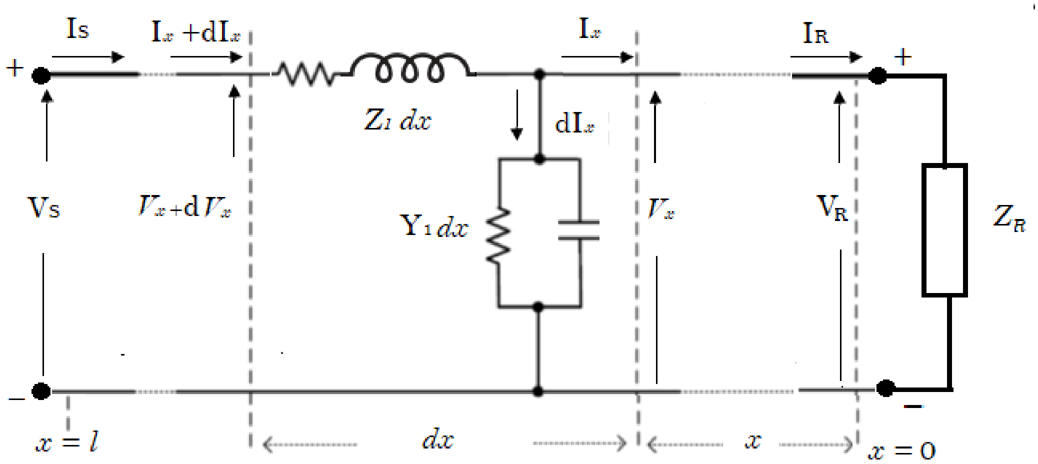
في الحالة المستقرة عندما تسلط عليه فولتية متناوبة صيغة الموجة لها جيبية ذات تردد ثابت مقداره f.

في هذه الفقرة سوف يشير الرمز السفلي 1 إلى قيمة معينة لكل كيلو متر، فعلى سبيل المثال تكون Y_1 و Z_1 المسامحة بالسيمنس / كم والممانعة بالأوم / كم على التعاقب ولا يشير الرمز السفلي 1 إلى قيم التتابع الموجب ، على الرغم من أن هذا الفصل يتعامل مع الحالات المتوازنة فقط أي حالات التتابع الموجب ، عليه تكون Y و Z هي القيم المقابلة لمجموع المسامحات والممانعات للخط أي أن. $Y = Y_1\ l$ وكذلك $Z = Z_1\, l$ ، حيث l هو الطول بالكيلومتر .

يوضح الشكل 2-11 خط متجانساً معينا لمقطع صغير جداً مقداره dx على مسافة x من طرف الاستلام بحيث تكون ممانعة التوالي للخط هي $Z_1\, dx$ حيث $Z_1 = R_1 + j2\,\pi f L_1$

وتكون مسامحة التفرع له هي $Y_1\, dx$ حيث $Y_1 = G_1 + j2\pi C_1$ ويكون الهبوط بالفولتية في المقطع (من اليسار إلى اليمين) هو:

$$(V_x + dV_x) - V_x = dV_x = (I_x + dI_x)Z_1 dx \simeq I_x Z_1 dx$$



الشكل 2-11 خط طويل متجانس .

وعند إهمال الحدود ذات الدرجة الثانية ينتج:

$$dI_x \simeq V_x Y_1 dx$$

وبالأسلوب نفسه فان النتيجة تكون:

$$\frac{dV_x}{dx} = Z_1 I_x \qquad (2.22 - أ)$$

$$\frac{dI_x}{dx} = Y_1 V_x \qquad (2.22 - \text{ب})$$

وبمفاضلة أي من المعادلتين أعلاه بالنسبة لـ x وتعويضها بالأخرى ينتج:

$$\frac{d^{2V_x}}{dx^2} = Y_1 Z_1 V_x \qquad (2.23 - \text{أ})$$

$$\frac{d^{2I_x}}{dx^2} = Y_1 Z_1 I_x \qquad (2.23 - \text{ب})$$

هاتان المعادلتان تفاضليتان قياسيتان واعتياديتان من الدرجة الثانية وذواتا معاملات ثابتة.

من المفيد في هذه المرحلة تقديم بعض التعابير التي سوف تجري مناقشتها بالتفصيل لاحقاً (الفقرة2-8-3)، عليه سنعرف الحرف جاما اللاتيني بوصفه $\gamma = \sqrt{(Y_1 Z_1)} = \alpha + j\beta$ ، حيث γ هو معامل الانتشار لكل كيلومتر ، أما α فهي معامل التضاؤل بالنيبر لكل كيلومتر ، وβ هي معامل تغير الطور بالدرجات النصف قطرية / كم . كذلك سنقوم بتعريف الممانعة الطبيعية المميزة للخط Z_C بوصفها :

$$\sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = Z_C$$

لاحظ أن Z_C لا تكون معتمدة على طول الخط نفسه (هناك رمز آخر للممانعة Z_C في بعض المراجع وهو Z_O إلا أننا سوف لا نستخدم الرمز الأخير هذا حتى لا يحصل إرباك للقارئ بينه وبين ممانعة التتابع الصفري الذي يستخدم في موضوع المركبات المتماثلة) .

كذلك يمكن كتابة حل المعادلة (2.23- أ) بالصيغة الأسية وكما يأتي :

$$V_x = a\, e^{\gamma x} + b\, e^{-\gamma x} \qquad (2.24 - \text{أ})$$

حيث أن a وb هما ثابتا التكامل. بمفاضلة المعادلة (2.24- أ)بالنسبة إلى x والتعويض من المعادلة (2.22- أ) نحصل على :

$$I_x = \frac{a\gamma\, e^{\gamma x} - b\gamma\, e^{-\gamma x}}{Z_1}$$

$$= \frac{a\, e^{\gamma x} - b\, e^{-\gamma x}}{Z_1} \qquad (2.24 - \text{ب})$$

يمكن الحصول على قيم للثابتين a و b وذلك بتعويض الشروط الحدودية المعروفة مسبقاً من حيث أنه عندما تكون $x = 0$ فان $V_R = Vx$ وكذلك $I_x = I_R$ ، عليه فأن :

$$I_x = I_R \quad ، \quad V_R = V_x$$

$$V_R = a + b$$

$$I_R = \frac{a - b}{Z_c}$$

$$a = \frac{1}{2}(V_R + Z_c I_R)$$

$$b = \frac{1}{2}(V_R - Z_c I_R)$$

أما الصيغ الرياضية لمعادلات فولتية طرف الإرسال والتيار فيمكن الحصول عليها الآن بالتعويض عن $x = l$ في (2.24) مع ملاحظة أن:

$$e^{\gamma l} = e^{\alpha l + j\beta l} = e^{\alpha l} e^{j\beta l}$$

$$= e^{\alpha l}(cos\beta l + j\, sin\beta l)$$

$$= \ e^{\alpha l}\ \angle \beta l$$

$$V_s = \frac{1}{2}(V_R + Z_c I_R) e^{\gamma l} + \frac{1}{2}(V_R - Z_c I_R) e^{-\gamma l}$$

$$= \frac{1}{2}(V_R + Z_c I_R) e^{\alpha l} \angle\, \beta l + \frac{1}{2}(V_R - Z_c I_R) e^{-\alpha l}\ \angle - \beta l \qquad (2.25 - \text{أ})$$

$$I_s = \frac{1}{2}\left(\frac{V_R}{Z_c} + I_R\right) e^{\gamma l} - \frac{1}{2}\left(\frac{V_R}{Z_c} - I_R\right) e^{-\gamma l}$$

$$= \frac{1}{2}\left(\frac{V_R}{Z_c} + I_R\right) e^{\alpha l}\angle\, \beta l - \frac{1}{2}\left(\frac{V_R}{Z_c} - I_R\right) e^{-\alpha l} \angle -\beta l \qquad (2.25 - ب)$$

لبيان بعض من أهمية هذه المعادلات الرياضية وذلك بافتراض أن لخط قدرة طويل ذي فولتية عالية ، $Y_1 = 3.5 \angle 90°$ ميكروسيمنس / كم (باهمال مفاقيد التسرب والهالة) وكذلك $Z_1 = 0.039 + j0.327$ أي $Z_1 = 0.33\angle 83.2°$ أوم / كم . لذا فان:

$$\gamma \simeq 1.08 \times 10^{-3} \angle 86.6° \text{ لكل كيلومتر}$$

$$\alpha \simeq 6.2 \times 10^{-5} \text{ لكل كيلومتر}$$

$$\beta \simeq 1.08 \times 10^{-3} \text{ نصف قطرية لكل كيلومتر} \simeq 0.06° \text{ لكل كيلومتر}$$

$$Zc \simeq 306 \angle -7° \text{ أوم}$$

حيث تمثل Z دائرة توالي لها مقاومة وكذلك متسعة كبيرة، وبإعادة ترتيب (2.25) وبالتعويض بالمقدارين التاليين:

$$\frac{1}{2}(e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}) = \cosh\ \gamma l$$

$$\frac{1}{2}(e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}) = \sinh\ \gamma l$$

ينتج:

$$V_s = (\cosh \gamma l)V_R + (\sinh \gamma l)Z_c I_R \qquad (2.26 - أ)$$

$$I_s = \left(\frac{\sinh \gamma l}{Z_c}\right)V_R + (\cosh \gamma l)I_R \qquad (2.26 - ب)$$

كما تعطي المعادلتان (2.25) و (2.26) فولتية طرف الإرسال والتيار بدلالة فولتية وتيار طرف الاستلام. من الواضح أيضاً أن هذه المعادلات يمكن أن تعطي الفولتية V_X والتيارI_X عند أية نقطة x من طرف الاستلام إذا ما تم تعويض l بـ x أو إذا ما عبر عن كل منY بمسامحة التفرع و Z بممانعة التوالي بدلالة الطول x من الخط نفسه. عليه فان معادلات الخط الطويل المتجانس يمكن أن تعطي الحلول في أية نقطة على طول الخط على خلاف التمثيلات الأخرى التي تنطبق فقط

عند أطراف الخط. ويمكن ايضا كتابة المعادلتين (2.25) و (2.26) باستخدام طريقة الشبكة ذات المنفذين بالصيغة العامة وكما يأتي:

$$V_s = AV_R + BI_R \qquad (2.27 - أ)$$

$$I_s = CV_R + DI_R \qquad (2.27 - ب)$$

وتنطبق المعادلات العامة هذه على جميع تمثيلات الخطوط التي تمت مناقشتها لحد الآن كما سنتطرق اليها لاحقا. ويمكن للمعادلة (2.27) أن تقلب لتعطي ظروف طرف الاستلام بدلالة ظروف الإرسال وكالآتي:

$$V_R = DV_s - BI_s \qquad (2.28 - أ)$$

$$I_R = CV_s - AI_s \qquad (2.28 - ب)$$

وللبرهنة على هذه نستخدم حقيقة ان للخط الهامد تكون : AD-BC= 1 .

هذه التمثيلات للخطوط تعرف في الهندسة الكهربائية بالشبكة ذات المنفذين أونموذج ABCD ، حيث تكون الثوابت للخط القصير :

A=1 B=Z C=0 D=1

ذالك لأن : $I_S = I_R = I$. ويبين الجدول 1-1 خلاصة لمعادلات الخطوط.

3-8-2 قياس معالم (ثوابت) الخط الطويل المتجانس

إذا كانت ممانعة الحمل هي : $Z_R = \frac{V_R}{I_R}$

فإن ممانعة نقطة السوق (أو المصدر) Z_d على الحمل تكون:

$$Z_d = \frac{V_s}{I_s} = \frac{(\cosh \gamma l)V_R + (\sinh \gamma l)Z_c I_R}{(\sinh \gamma l)\left(\frac{V_R}{Z_c}\right) + (\cosh \gamma l)I_R}$$

$$= Z_c \left(\frac{Z_R \cosh \gamma l + Z_c \sinh \gamma l}{Z_R \sinh \gamma l + Z_c \cosh \gamma l}\right) \quad (2.29)$$

حيث أن

$$\gamma l = l\sqrt{Y_1 Z_1} = \sqrt{YZ}$$

ويمكن الحصول على المعالم (الثوابت) للخط الطويل المتجانس بعمل فحصي الدائرة المفتوحة والدائرة القصيرة واللذين يتم اجراؤهما عند إحدى نهايتي الخط. فمن المعادلة (2.29) تكون ممانعة السوق في حالة الدائرة المفتوحة هي :

$$Z_{do} = \frac{Z_c}{\tanh \gamma l} \quad (2.30)$$

وتكون في حالة الدائرة القصيرة:

$$Z_{ds} = Z_c \tanh \gamma l \quad (2.31)$$

وبحل هاتين المعادلتين ينتج :

$$Z_c = (Z_{ds} Z_{do})^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

$$\tanh \gamma l = \left(\frac{Z_{ds}}{Z_{do}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.33)$$

$$\sinh \gamma l = \left\{\frac{Z_{ds}}{Z_{do} - Z_{ds}}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.34)$$

$$\cosh \gamma l = \left\{\frac{Z_{do}}{Z_{do} - Z_{ds}}\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.35)$$

الجدول 2-1 معادلات خطوط النقل

الخط القصير

$$A = 1 \qquad B = Z$$
$$C = 0 \qquad D = A$$

الخط المتوسط ـ خط π

$$A = 1 + \frac{YZ}{2} \qquad B = Z$$
$$C = Y\left(1 + \frac{YZ}{4}\right) \qquad D = A$$

الخط المتوسط ـ خطT

$$A = 1 + \frac{YZ}{2} \qquad B = Z\left(1 + \frac{YZ}{4}\right)$$
$$C = Y \qquad D = A$$

الخط الطويل المتجانس

$$A = \cosh \gamma l \qquad B = Z_c \sinh \gamma l$$
$$= cosh\sqrt{YZ}$$
$$= Z\left(\frac{\sinh\sqrt{YZ}}{\sqrt{YZ}}\right) + \frac{YZ}{2} + \frac{(YZ)^2}{24} + \cdots$$
$$= Z(1 + \frac{YZ}{6} + \frac{(YZ)^2}{120} + \cdots)$$

$$= 1 + \frac{Y_1 Z_1}{2} l^2 + \frac{(Y_1 Z_1)}{24} l^4 + \cdots$$

$$= Z_1 \left(\frac{Y_1 Z_1}{6} l^3 + \frac{(Y_1 Z_1)^2}{120} l^5 + \cdots \right)$$

$$C = Y_c \sinh \gamma l \qquad\qquad D = A$$

$$= Y \left(\frac{\sinh \sqrt{YZ}}{\sqrt{YZ}} \right)$$

$$= Y \left(1 + \frac{YZ}{6} + \frac{(YZ)^2}{120} + \cdots \right)$$

$$= Y_1 \left(1 + \frac{Y_1 Z_1}{6} l^3 + \frac{(Y_1 Z_1)^2}{120} l^5 + \cdots \right)$$

الان بتعويض $Z_D = Z_R$ في المعادلة (2.29) عليه وجب تبيان أنه لتحقيق هذا الشرط يجب أن تكون $Z_R = Z_C$. وبما أن هذه النتيجة غير معتمدة على طول الخط l . فهي إذن صحيحة لأي طول x .عليه ففي أية نقطة تبعد x على طول خط ينتهي بممانعة تساوي ممانعته المميزة Z_C فان النسبة بين الفولتية والتيار في تلك النقطة V_X / I_X تكون عدداً ثابتاً يساوي ممانعة الخط المميزة نفسها . واذا تم تعويض الشرط $Z_R = Z_C$ في (2.25) فسوف يتبين أن الحد الثاني من هذه المعادلة يؤول إلى الصفر (أي أنه لا توجد أمواج منعكسة للفولتية أو التيار) ضمن الخط .

9-2 الشبكة ذات الاطراف الاربعة (ذات المنفذين) العامة: الثوابت ABCD

GENERAL 4-TERMINAL (2-PORT) NETWORK: ABCD CONSTANTS

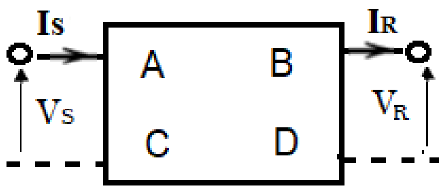
إن تمثيلات الخط القصير ودوائرπ و T الرمزية وكذلك الخط الطويل المتجانس التي تمت مناقشتها سلفاً في هذا الفصل هي طرق خاصة لتحليل أداء خط نقل معلوم. لكن التوجه الحديث في تحليلات هذه الخطوط هو إيجاد طريقة ما تكون عامة في تطبيقاتها. لذلك فان ما سنذكره يمكن تطبيقه على أية دائرة كهربائية مع كونه يخص بصورة رئيسية خطوط النقل ، أما التحديدات التي تظهر في هذا الخصوص فهي أن الدوائر (المبينة في الشكل2-12) يجب أن

تكون ذات اربعة اطراف (أو منفذين) وكذلك تكون هامدة (لا يوجد فيها مصدر داخلي للقوة الدافعة الكهربائية او مصدر للقدرة) كذلك تكون خطية (ثابتة الممانعات ، أي لا تعتمد المقاومة R والمفاعلة X على مقدار الفولتية المسلطة عليها أو على التيار المار فيها أو أي متغير آخر) وتكون كذلك ذات اتجاهين (الممانعات تبقى نفسها بغض النظر عن اتجاه جريان التيار) . على هذا الأساس فان هذه الدوائر لا تشمل تلك التي لها ملفات ذات قلب حديد وكذلك المقومات Rectifiers. أما المحولات فيمكن شمولها بهذه الطريقة إذا ما تم إهمال تيار الإثارة في حالة اللاحمل في الدائرة المتفرعة (المتوازية) المكافئة لدائرة الإثارة في المحول.

اذا اعتبرنا كل من V_R و I_R متغيرين غير معتمدين، أي يمكن أن يعطي لهما أية قيمة فان V_S و I_S يصبحان متغيرين معتمدين ويكون اعتمادهما على V_R و I_R وينسبان إليهما بالمسامحة Y والممانعة Z للخط . والصيغة العامة للمعادلات الخطية الآنية الناتجة هي:

$$V_s = AV_R + BI_R \qquad (2.36)$$

$$I_s = CV_R + DI_R \qquad (2.37)$$



الشكل 2-12 الشبكة ذات الأطراف ألأربعة.

إن كل من A ، B ، C وكذلك D هي قيم عددية تدعى بثوابت الشبكة ذات الاطراف الاربعة العامة وهي الحروف الهجائية الأولى الأربعة فقط (وهنا لا تكون B هي التقبلية وكذلك لا تكون C المتسعة). والمقارنة بين الثوابت ABCD لعدة تمثيلات لخطوط النقل قد تم ايجادها وذكرها سابقا في الجدول 2-1 في الفقرة 2-8-3. أما وحدات A,B,C وكذلك D فيجب ان تكون بحيث تؤلف معادلات متوافقة. لذا يجب أن لا تمتلك A وD أية وحدات، أما B فيجب ان تكون كممانعة وكذلك C يجب أن تكون كمسامحة.

1-9-2 هبوط الفولتية وتنظيم الفولتية

VOLTAGE DROP AND VOLTAGE REGULATION

إن هبوط الفولتية وتنظيم الفولتية لخط ما قد تم التطرق إليهما في الفقرة 2-4 ، وكلا هذين التعبيرين تم افتراضهما ليشيرا الى ان الحمل في طرف الاستلام للخط يكون بقيمته المقننة إلا إذا أشير إلى غير ذلك . أو ليشيرا إلى مولد يجهز خرجاً مقنناً أو محول مجهز بفولتية مقررة عند ملفه الابتدائي ويعطي تياراً ثانوياً مقنناً . والمحول يقنن بدلالة نسبة فولتية اللاحمل له وخرجه المقنن والذي هو حاصل ضرب فولتية اللاحمل له في تيار الحمل الكلي في الثانوي. لذا فعند الحمل المقنن، يمكن حساب V_S من (2.36) وكذلك الهبوط بالفولتية حيث يكون تنظيم الفولتية معطى بالمعادلة التالية:

$$\text{تنظيم الفولتية} = V_S - V_R \quad \text{فولت} \tag{2.38}$$

و بإبقاء قيمة V_S مساوية الى قيمتها في حالة الحمل التام فإن قيمة فولتية طرف الاستلام في حالة اللاحمل V_{Ro} تستخرج من المعادلة (2.36) كالآتي :

$$V_{Ro} = \frac{V_S}{A} \quad \text{فولت} \tag{2.39}$$

وكذلك:

$$\text{تنظيم الفولتية} = V_{Ro} - V_R \quad \text{فولت} \tag{2.40}$$

ويعبر عادة عن هبوط الفولتية وتنظيم الفولتية بالنسبة المئوية من الفولتية المقننة. وهنا نذكر القارئ بأنه عندما يحتوي خط على متسعة مربوطة على التوازي ويشتغل في حالة اللاحمل فان فولتية اللاحمل لطرف الاستلام V_{RO} تكون عادة أكبر من فولتية طرف الارسال V_S وذلك لكون $A < 1$.

2-9-2 الشبكة الهامدة المتماثلة SYMMETRICAL , PASSIVE NETWORK

باستخدام نظرية التعاكس سوف نبين أنه لشبكة متماثلة :

$$A = D \tag{2.41}$$

ولشبكة هامدة يكون المحدد كالآتي:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = AD - BC = 1 \qquad (2.42)$$

في الشكل 2-13 (أ) يكون الخرج مقصور الدائرة وعليه تصبح (2.36)

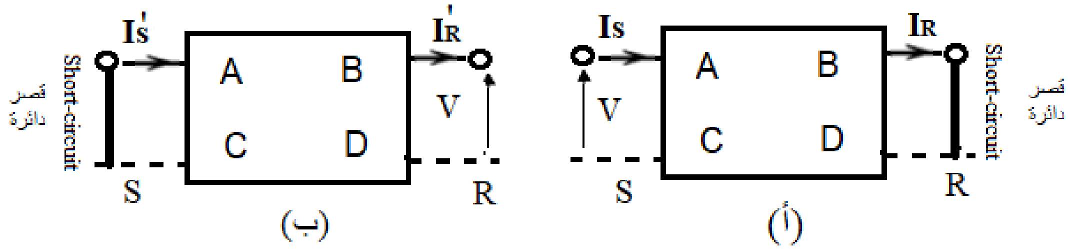
$$V = BI_R$$

$$I_s = DI_R$$

وممانعة الدائرة القصيرة لممانعة نقطة السوق (الدخل) عند طرف الارسال تكون:

$$Z_{ds} = B/D$$

يلاحظ انه في هذا الإجراء لم تتغير الشبكة في الشكل 2-13 (ب) ، لكن أقطاب التيارات هي التي انعكست :



الشكل 2-13 شبكة هامدة متماثلة.

لذا ففي (2.36) يمكننا كتابة I'_S للتيار بدل I_s وكذلك I'_R للتيار بدل I_R وأيضاً جعل $V_S = 0$ ، وكذلك $V_R = V$ لذا :

$$0 = AV - BI_R^{`}$$

$$-I_s^{`} = CV - DI_R^{`}$$

وتكون عندئذ ممانعة نقطة السوق (الدخل) في حالة الدائرة القصيرة في طرف الاستلام هي:

$$Z_{ds} = V/I_R^{`} = B/A$$

واذا كانت الشبكة متماثلة، فيجب أن تكون ممانعة الدخل متساويتين، وعليه فان A =D .

وتنص نظرية التعاكس بأنه إذا سببت فولتية V في أحد الفروع لشبكة خطية الخواص هامدة تيار I_R في فرع آخر في الشبكة فإن الفولتية نفسها في الفرع الثاني سوف تسبب التيار نفسه في الفرع الأول وعليه فان:

$$I_R = I_s^{`}$$

$$\frac{V}{B} = -CV + \frac{DAV}{B}$$

$$AD - BC = 1$$

3-9-2 قياس المعالم MEASUREMENT OF PARAMETERS

تكون ممانعة نقطة السوق (الدخل) لشبكة ذات أطراف أربعة مربوط عليها حمل ممثل بممانعة $Z_R = V_R/I_R$ كما يلي :

$$Z_d = \frac{V_s}{I_s} = \frac{AV_R + BI_R}{CV_R + DI_R} = \frac{AZ_R + B}{CZ_R + D} \tag{2.43}$$

وإذا كانت $Z_d = Z_R$ يكون:

$$CZ_R^2 + (D - A)Z_R - B = 0$$

وإذا كانت الشبكة متماثلة عندئذ تكون $A = D$ وكذلك $Z_d = Z_R$ عندما تكون:

$$Z_R = \sqrt{(B/C)} \tag{2.44}$$

هذه القيمة الخاصة من Z_R تدعى بالممانعة المميزة للشبكة : الشبكة المتماثلة تكون الممانعات المميزة والخيالية والدورية فيها متساوية جميعها ، وتكون هذه الممانعات مهمة لمهندس الاتصالات وتكمن أهميتها في انتقال القدرة العظمى بين شبكتين متوافقتين .

عندما تكون الشبكة مفتوحة الدائرة فان ممانعة الدخل من (2.36) تصبح:

$$Z_{do} = \frac{A}{C} \quad (2.45)$$

وكذلك عندما تكون مقصورة الدائرة، فتكون ممانعة الدخل:

$$Z_{ds} = \frac{B}{D} \quad (2.46)$$

وإذا كانت الشبكة من النوع المتماثل الهامد، فعليه يمكن أن نبين أن:

$$A = \sqrt{\left[\frac{Z_{do}}{Z_{do} - Z_{ds}}\right]} = D \quad (2.47)$$

$$B = AZ_{ds} \quad (2.48)$$

$$C = \frac{A}{Z_{do}} \quad (2.49)$$

إن أياً من هذه المعالم يمكن اعطاء تفسير فيزيائي له بدلالة المعلومات التي يتم الحصول عليها من خلال فحص الدائرة المفتوحة والدائرة القصيرة لذلك فمن فحص الدائرة المفتوحة:

$$A = \frac{V_{so}}{V_{Ro}} \quad (2.50)$$

وهي الدالة التحويلية لفولتية الدائرة المفتوحة.

تشير كلمة التحويلية إلى أن كلتا الفولتيتين تقاسان في الوقت نفسه عند طرفي الخط إلا أنه من الصعوبة العملية تطبيق هذا الاقتراح على خطوط نقل القدرة وذلك بسبب محاولة تضمين قياس فرق الطور بين V_{So} و V_{Ro} في حالة الدائرة القصيرة :

$$B = \frac{V_{Ss}}{I_{Rs}} = Z_{ts} \quad (2.51)$$

وهي الممانعة التحويلية للدائرة القصيرة. وفي حالة الدائرة المفتوحة

$$C = \frac{I_{So}}{V_{Ro}} = Y_{to} \quad (2.52)$$

وهي المسامحة التحويلية للدائرة المفتوحة. وفي حالة الدائرة القصيرة

$$D = \frac{I_{Ss}}{I_{Ro}} \qquad (2.52)$$

وهي الدالة التحويلية لتيار الدائرة القصيرة.

10-2 تطبيق طرق المصفوفات APPLICATION OF MATRIX METHODS

إن التعامل مع معادلات الشبكة ذات الأطراف الأربعة التي تم شرحها في الفقرة السابقة يكون سهلاً جداً باستخدام طرق المصفوفات الرياضية، لذا يمكن كتابة المعادلة (2.27) بصيغة المصفوفة كما يأتي :

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \qquad (2.53)$$

حيث أن المصفوفة $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ تدعى بمصفوفة التحويل للشبكة.

أما الآن فسنتطرق إلى بعض الحالات الخاصة للشبكات ذات الأطراف الأربعة (انظر الجدول 2-1)

(أ) ممانعة التوالي Z لخط قصير أو مولد:

$$V_s = V_R + ZI_R$$

$$I_s = I_R$$

مصفوفة التحويل هي : $\begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.

(ب) مسامحة التوازي Y : دائرة محول في حالة اللاحمل

$$V_s = V_R$$

$$I_s = YV_R + I_R$$

مصفوفة التحويل هي : $\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y & 1 \end{bmatrix}$.

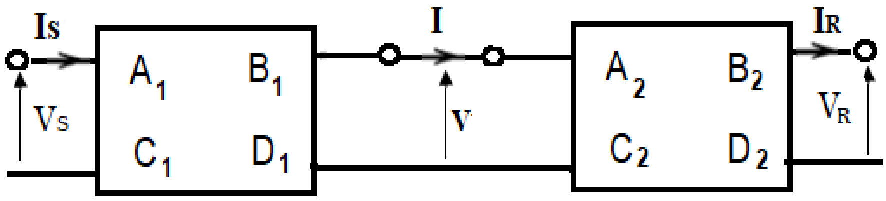
(جـ) شبكة π غير متماثلة

ان هذه عبارة عن ربط تعاقبي لمسامحة توازٍ تتبعها ممانعة وتتبعها كذلك محاثة توازٍ. ويتم الحصول على مصفوفة التحويل الكلية بضرب المصفوفات التحويلية للأجزاء المكونة الثلاثة، لذا:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_a & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_b & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1+Y_bZ) & Z \\ (Y_a+Y_b+Y_aY_bZ) & (1+Y_aZ) \end{bmatrix}$$

واذا كانت الشبكة متماثلة وكانت $Y_a = Y_b = Y/2$ حيث Y هي مسامحة التوازي الكلية ، فعندئذ تقلص المصفوفة التحويلية الى تلك التي لخط نقل π الرمزي المتوسط الطول (انظر جدول 2-1) .

(ز) يبين الشكل 2-12 شبكتين رباعيتي الأطراف مربوطتين على التعاقب. باستطاعتنا أن نحصل على الثوابت ABCD للشبكة الكلية بالتعبير عن V و I بدلالة V_R و I_R ، وبعدها V_S و I_S بدلالة V و I ، ومن ثم حذف V و I .



الشكل 1-12شبكتان رباعيتا الأطراف مربوطتان على التعاقب .

لذا يمكن الحصول على مصفوفة التحويل (وأيضاً الثوابت (A,B,C,D بطريقة أخرى ذلك بضرب مصفوفتي التحويل للشبكتين ببعضهما وكالآتي :

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} (A_1A_2+B_1C_2) & (A_1B_2+B_1D_2) \\ (C_1A_2+D_1C_2) & (C_1B_2+D_1D_2) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \qquad (2.54\ \ )$$

(ح) يمكن إعادة ترتيب المعادلة 2-27 لتعبر عن الفولتيتين V_S و V_R بدلالة التيارين I_S و I_R وبما أن الشبكات هي هامدة ، لذا يكون AD-BC = 1 وكذلك :

$$V_s = \left(\frac{A}{C}\right) I_s - \left(\frac{I}{C}\right) I_R \qquad (2.55)$$

$$V_R = \left(\frac{I}{C}\right) I_s - \left(\frac{D}{C}\right) I_R \qquad (2.56)$$

وهاتان المعادلتان يمكن كتابتهما كالآتي :

$$V_s = Z_{ss} I_s + Z_{SR} I_R \qquad (2.57)$$

$$V_R = Z_{Rs} I_s + Z_{RR} I_R \qquad (2.58)$$

وكذلك يمكن تقليصهما أكثر الى صيغة مصفوفة:

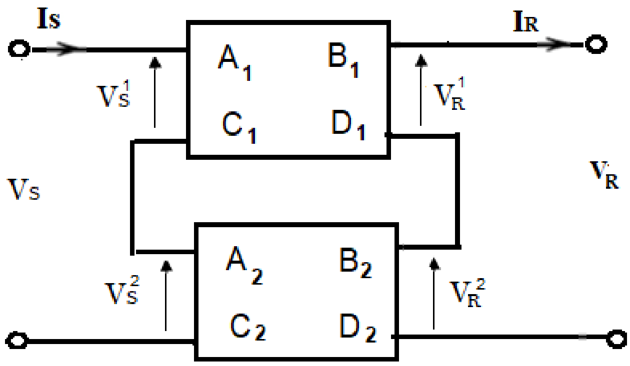
$$[V] = [Z][I]$$

حيث Z_{SS} هي ممانعة الدائرة المفتوحة لممانعة نقطة السوق عند طرف الإرسال والتي أُستعمل الرمز Z_{do} لتمثيلها في الفقرة 2-9-3 من هذا الفصل. أما Z_{RS} و Z_{SR} واللتان تكونان متساويتين في الشبكة الثنائية الأطراف ، فهما الممانعتان التحويليتان للدائرة المفتوحة وعليه فمن المعادلة (2.52) تكون $Z_{RS} = \frac{1}{Y_{to}}$ ، أما $[Z]$ فتدعى مصفوفة الممانعة للشبكة ويمكن التعرف على مكونات هذه المصفوفة بدلالة الثوابت A,B,C,D من المعادلتين (2.55) و (2.56).

وتبسط مصفوفة الممانعة مسائل الشبكات رباعية الطرف المربوطة على التوالي، أي أن دخليهما يكونان على التوالي، وكذلك يكون خرجهما على التوالي أيضاً (أنظر الشكل 2-13) وإذا عرفت الشبكتان بالرمزين العلويين (1) و (2) يكون:

$$\begin{bmatrix} V_s^1 \\ V_R^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ss}^1 & Z_{SR}^1 \\ Z_{RS}^1 & Z_{RR}^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_R \end{bmatrix}$$

وتكون معادلة الشبكة (2) مشابهة للمعادلة أعلاه، وبما أن V_S و V_R كليهما من مجموع الاجزاء المكونة لهما فان:



الشكل 2-13 شبكتان رباعيتا الطرف مربوطتان على التوالي.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{R1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{S2} \\ V_{R2} \end{bmatrix} = [[Z_1] + [\, Z_2]] \begin{bmatrix} I_s \\ I_R \end{bmatrix} \qquad (2.59)$$

$$V_s = V_s^1 + V_s^2 \qquad\qquad V_R = V_R^1 + V_R^2$$

وتكون معادلة الشبكة (2) مشابهة للمعادلة أعلاه، وبما أن V_S و V_R كليهما من مجموع الاجزاء المكونة لهما فان:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_s^1 \\ V_R^1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_S^2 \\ V_R^2 \end{bmatrix} = [[Z^1] + [Z^2]] \begin{bmatrix} I_s \\ I_R \end{bmatrix}$$

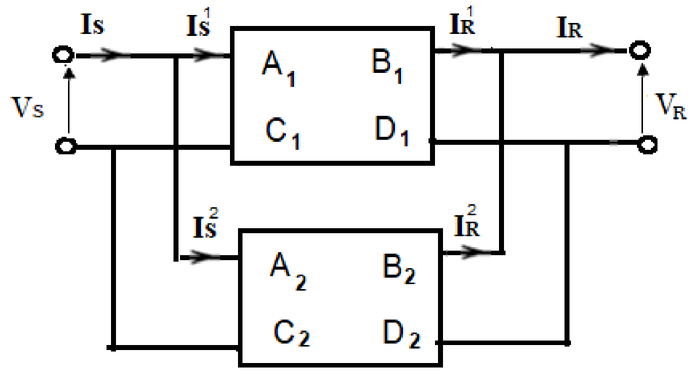
(ط) يبين الشكل 2-14 شبكتين مربوطتين على التوازي: دخلاهما يكونان على التوازي وكذلك خرجاهما على التوازي ايضاً. وقد وجد أن مصفوفة مسامحة الشبكة الكلية تكون:

$$[I] = [Y][V]$$

$$\begin{bmatrix} I_s \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{ss} & Y_{SR} \\ Y_{RS} & Y_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_R \end{bmatrix} \qquad (\, 2.60\,)$$

حيث أن :

$$[Y] = [Y^1] + [Y^2] = \begin{bmatrix} \left(\frac{D^1}{B^1} + \frac{D^2}{B^2}\right) & -\left(\frac{1}{B^1} + \frac{1}{B^2}\right) \\ \left(\frac{1}{B^1} + \frac{1}{B^2}\right) & -\left(\frac{A^1}{B^1} + \frac{A^2}{B^2}\right) \end{bmatrix} \qquad (2.61\,)$$



الشكل 2-14 شبكتان رباعيتا الطرف مربوطتان على التوازي.

$$I_s = I_S^1 + I_S^2 \qquad I_R = I_R^1 + I_R^2$$

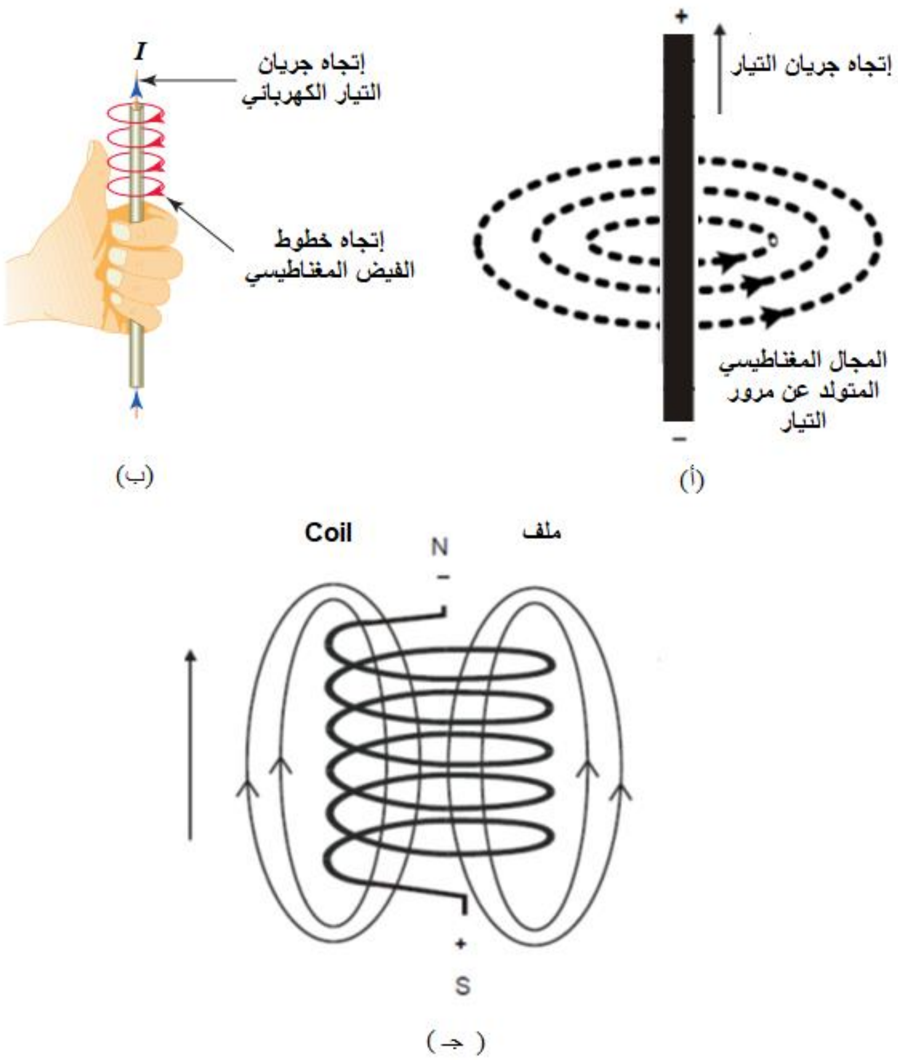
الفصل الثالث

محاثة خط النقل

TRANSMISSION LINE INDUCTANCE

1-2 مقدمة

من المعروف أنه إذا مر تيار كهربائي في سلك موصل فإنه يولد مجالاً مغناطيسياً يدور حول هذا الموصل كما هو موضح في الشكل 3-1(أ). ويعطى إتجاه دوران الفيض بموجب قاعدة اليد اليسرى كما موضح في الشكل 3-1 (ب). كذلك ينشأ مجال مغناطيسي حول ملف يحمل تيار كهربائي كما موضح في الشكل 3-1 (جـ). ويكون هذا المجال ثابتاً لايتغير مع الزمن إذا كان التيار الذي يولده مستمراً .D.C، ويكون متغير مع الزمن إذا كان التيار الذي يولده متناوباً .A.C.



الشكل 3-1 يتولد المجال المغناطيسي نتيجة لجريان تيار كهربائي في موصل أو ملف.

وينص قانون فاراداي الأول على أنه إذا تغير الفيض المغناطيسي $\emptyset$ مع الزمن وارتبط هذا الفيض مع ملف أو مع أية دائرة كهربائية فستتولد قوة دافعة كهربائية (ق.د.ك) يرمز لها بالحرف e في الملف أو في الدائرة. هذه الفولتية تتناسب مع معدل تغير ترابط الفيض مع الزمن $\Delta\emptyset/\Delta t$.

الآن إذا كان لدينا فيض لحظي متغير مع الزمن مقداره $\emptyset$ ويبر (Weber الويبرهي وحدة قياس الفيض المغناطيسي) يرتبط بصورة كاملة مع ملف عدد لفاته N لفة، فان ترابط الفيض يكون $\emptyset N$ ويبر– لفة. فمثلاً إذا كان لدينا فيض مقداره 2 ويبر وملف بلفة واحدة فان ترابط الفيض يكون 2×1=2 ويبر- لفة. أما إذا زدنا عدد لفات الملف الى 10 فن ترابط الفيض سيكون 2×10 = 20 ويبر- لفة وهكذا. أما الفولتية أو القوة الدافعة الكهربائية e اللحظية المحتثة في الملف تكون بالفولت حسب قانون فاراداي الأول:

$$\text{الفولتية } e \text{ المتولدة} = \frac{\text{تغير الفيض}}{\text{تغير الزمن}} = \frac{\Delta\emptyset}{\Delta t}$$

$$\mathrm{e} = -\frac{d(\emptyset N)}{dt} \qquad (3.1)$$

وإذا كان عدد لفات الملف N ثابتاً فإن المعادلة (3.1) تصبح:

$$e = -N\left(\frac{d\emptyset}{dt}\right) \qquad (3.2)$$

وتكون قيمة e اللحظية 1 فولت إذا كان الفيض يتغير بمعدل 1 ويبر – لفة لكل ثانية (Weber-turn/second) . وإشارة السالب هنا تشير إلى أن e تكون في اتجاه وكأنها تحاول تمرير تيار يعاكس تغيرالفيض الذي أوجدها، كما نص على ذلك قانون لنز Lenz’s Law. وإذا كانت قيمة $\emptyset N$ تتناسب طردياً مع التيار المتغير اللحظي i المار في الملف الذي عدد لفاته N ، أي أن:

$$\emptyset N \propto i \qquad (3.3)$$

وإذا فرضنا أن المواد الفيرومغناطيسية (المواد القابلة للتمغنط مثل الحديد والنيكل وغيرها) ضمن الملف غير مشبعة مغناطيسيا بحيث تكون المعاوقة المغناطيسية $\mathscr{R}$ للدائرة المغناطيسية للملف ثابتة، فإن ثابت التناسب يمكن كتابته على أنه محاثة الملف L مقاسة بالهنري (Henry) وبذلك نستطيع أن نكتب العلاقة:

$$\emptyset N = Li \qquad (3.4)$$

بناءً عليه فاذا كان للملف محاثة ذاتية مقدارها هنري واحد (1H) وتغير التيار فيها بمقدار أمبيرواحد (1A) فسوف يسبب تغيراً في الفيض الرابط مقداره 1 ويبر- لفة (1Wb-turn) . وتبعا لذلك فان e المتولدة بالحث الذاتي تكون فولت $e = -d(Li)/dt$. وإذا كانت قيمة L ثابتة، فان

$$e = -L\left(\frac{di}{dt}\right)\text{volts} \quad (3.5)$$

في خطوط النقل التي تستخدم موصلات مصنوعة من الألمنيوم المقوى بمادة الصلب (الفولاذ) أي أن هذه الخطوط مع بعضها تشكل دوائر كهربائية، وعندما تحتوي الدائرة الواحدة منها على مادة فيرومغناطيسية مثل الفولاذ فإن الفيض لن يعد يتناسب مع التيار الممغنط كما تم تعريفه في المعادلة (3.3). لهذا فان المحاثة L في هذه الحالة سوف لا يمكن أن تعرف بوصفها قيمة تزايدية $d(\emptyset N)/di$ ، لكنها تعرف بوصفها تغيراً في الفيض الرابط عند إنعكاس إتجاه التيار مقسوما على تغير التيار نفسه.

الآن أفرض أن التيار الممغنط i يتغير بصورة جيبية مع الزمن بتردد قدره f هرتز وكانت له قيمة جذر متوسط تربيع مقدارها I أمبير فإن الفيض المترابط سيكون جيبياً أيضا وله قيمة جذر متوسط تربيع مقدارها $\emptyset N$. كذلك فإن قيمة جذر متوسط التربيع لـلفولتية e المحتثة بالفولت ستكون:

$$E = j\omega LI = j\omega\emptyset N \quad (3.6)$$

حيث أن $\omega = 2\pi f \text{ rad/s}$ وأن المحاثة L هي :

$$L = \left(\frac{\emptyset N}{I}\right) = \frac{\lambda}{I} \quad (3.7)$$

حيث λ يطلق عليها كمية الفيض المرتبط بالدائرة أو الملف = $\emptyset N$.

3-2 محاثة خط نقل منفرد

تحتوي خطوط النقل على أسلاك موصلة تسير بصورة متوازية مع بعضها لمسافات طويلة جداً. في البداية سوف نحاول إيجاد تعبير رياضي لترابط الفيض لموصل أسطواني منفرد يحمل تيار معين وهذا التيار يعود عن طريق مسار موضوع على مسافة بعيدة جداً من هذا الموصل. إن وضعية الموصل هذه تكوِن دائرة ذات لفة واحدة حيث تدور خطوط الفيض حوله على شكل دوائر متحدة المركز. ولأجل حساب محاثة الموصل من الضروري دراسة ترابط الفيض داخل الموصل نفسه وكذلك خارجه. هذا

التقسيم يساعدنا لكون أن الفيض داخل الموصل يترابط تدريجياً مع كمية صغيرة من التيار كلما أتجهنا إلى مركز الموصل نفسه . أما الفيض الخارجي فإنه يرتبط دائما بالتيار الكلي للموصل نفسه.

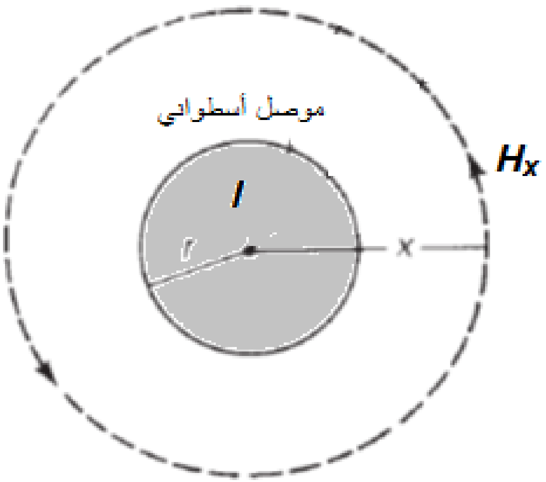
ولكي نتمعن في نمط توزيع المجال المغناطيسي حول الموصل المذكور فيجب علينا أن نستذكر قانون الدائرة المغناطيسية الذي ينص على أن تكامل شدة المجال المغناطيسي H أو ما تسمى أيضاً بالقوة الممغنطة حول أي مسار مغلق يكون مساوياً لمجموع التيار المرتبط مع ذلك المسار (قانون أمبير)، أي أن:

$$\oint H_x dx = IN$$

حيث H_x هو شدة المجال المغناطيسي المماس في نقطة تبعد مسافة x من مركز الموصل (وحداته أمبير - لفة لكل متر).

فاذا أخذنا مساراً دائرياً للفيض ذا نصف قطر قدره x متر حول موصل طويل مفرد يقع بعيداً جداً عن الموصل الراجع وكل من الموصلين الأصلي والراجع يحمل تيار له قيمة جذر متوسط تربيع مقداره I أمبير فان نتيجة التكامل أعلاه تعطي $I = 2\pi x H_x$ ، أنظر الشكل 3-2 ، (في هذه الحالة تكون الدائرة ذات لفة واحدة أي N=1) . والرمز السفلي في H_x يشير إلى أن جذر متوسط التربيع للقوة الممغنطة عند نصف القطر x تكون مماسة في جميع النقاط حول المسار الدائري وبذلك فإن القوة الممغنطة H تكون:

$$H_x = \frac{I}{2\pi x} \qquad (3.8)$$



الشكل 3-2 المجال المغناطيسي حول موصل أسطواني يحمل تيار مقداره I أمبير.

3-2-1 المحاثة الداخلية Li لخط نقل منفرد

الشكل 3-3 يعطي مقطعاً عرضياً لموصل أسطواني الشكل ذي نصف قطر r يحمل تيار متناوب قيمة جذر متوسط التربيع له I . فإذا افترضنا أن كثافة التيار متوزعة بانتظام على مقطع السلك أو الموصل تكون قيمتها ثابتة. وهذا الإفتراض لا يكون صحيحا إلا إذا تم مايأتي:

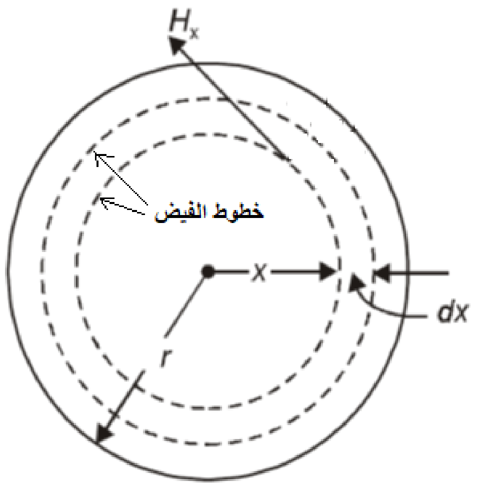
(أ) إهمال التأثير السطحي (القشري) الناجم عن التردد 50 هرتز للتيار المار في الموصل،

(ب) إهمال عدم الإنتظام بالطول بسبب تدلي سلك الموصل أو بسبب تمغنط السلك الفولاذي الذي يستعمل لتقوية الموصل المصنوع من الألمنيوم،

(جـ) إهمال تأثير التقارب الذي تسببه التيارات في الموصل كونه يتسبب بواسطة المجال المغناطيسي الناشئ عن التيار المار في الموصل الراجع البعيد.

وعلى أساس هذه الإفتراضات، فإذا كانت خطوط الفيض الناشئة ضمن (داخل) موصل نصف قطره r كما موضحة في الشكل 3-3، وكان المجال المغناطيسي متماثلاً ومتجانساً فإن شدة المجال H_x يكون ثابتاً في جميع النقاط المتساوية البعد عن مركز الموصل. لذلك فإن:

$$2\pi x H_x = I_x \qquad (3.9-أ)$$



الشكل 3-3 مقطع عرضي يبين الفيض المترابط ضمنيا داخل الموصل المنفرد.

وحيث أننا افترضنا أن خطوط الفيض المغناطيسي الناشئة داخل الموصل المنفرد هي دوائر متحدة المركز مع محور الموصل نفسه بحيث أن كل خط من هذه الخطوط سيرتبط فقط مع جزء صغير من تيار الموصل الكلي I ، فمثلاً خط الفيض الذي يكون عند نصف قطر مقداره (x) ، حيث المسافة

x أصغر من نصف قطر الموصل r يرتبط فقط مع جزء من التيار مقداره I_x . هذا التيار يمكن إيجاد قيمته بفرض إهمال تأثير القشرة وأن كثافة التيار متجانسة داخل الموصل؛ عليه تكون قيمته:

$$I_x = I\left(\frac{\pi x^2}{\pi r^2}\right) = I\left(\frac{x^2}{r^2}\right) \qquad (3.9 - ب)$$

ومن المعادلتين (أ – 3.9) و (ب – 3.9) نحصل على:

$$H_x = \frac{I.x}{2\pi r^2} \quad AT/m \qquad (3.10)$$

ولأي موصل غير قابل للمغنطة مثل الموصلات المصنوعة من الألمنيوم مثلاً، له إنفاذية مغناطيسية μ_0 مساوية لأنفاذية الهواء تكون كثافة الفيض B_x على بعد x من المركز:

$$B_x = \mu_0 . H_x = \frac{\mu_0\, I.x}{2\pi r^2} \qquad (3.11)$$

حيث μ_0 هي إنفاذية الهواء = $4\pi \times 10^{-7}$

الآن إذا أخذنا كميات جزئية صغيرة من الفيض ذات قيمة $d\emptyset_x$ ويير لمنطقة صغيرة جداً بعرض dx وبطول متر واحد من الموصل فإن قيمته تكون:

$$d\emptyset_x = B_x . d_x . 1 = \frac{\mu_0\, I}{2\pi r^2} x\, d_x$$

هذا الفيض الجزئي سوف يرتبط مع جزء من الموصل فقط. أي أنه يرتبط مع لفة جزئية قيمتها $\left(\frac{\pi x^2}{\pi r^2}\right)$ من التيار الكلي أي أن ترابط الفيض λ يكون:

$$\lambda = \left(\frac{\pi x^2}{\pi r^2}\right) d\emptyset_x = B_x . d_x . 1 = \frac{\mu_0\, I}{2\pi r^2} x^3\, d_x$$

وبأخذ تكامل المعادلة أعلاه ينتج:

$$\lambda = \int_0^r \frac{\mu_0\, I}{2\pi r^2} x^3\, d_x = \frac{\mu_0\, I}{8\pi} \quad W.T/m$$

وبقسمة هذا المقدار على التيار نحصل على المحاثة الذاتية للموصل L_i:

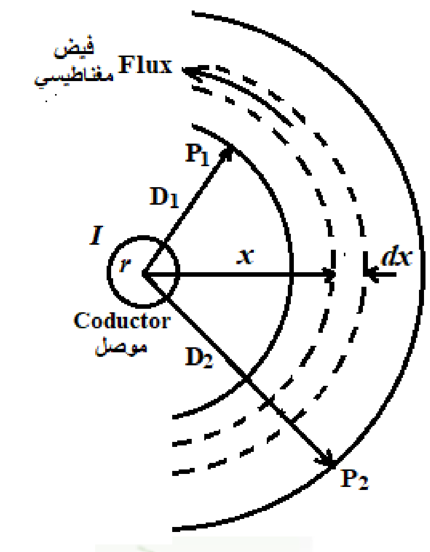
$$\therefore L_i = \frac{\lambda}{I} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \frac{H}{m} \qquad (3.12)$$

مما تجدر الإشارة إليه هوأن جميع التحليلات الواردة في أعلاه تفترض أن الموصل تكون مادته متجانسة وغير قابلة للمغنطة. كذلك يجب ملاحظة أن المحاثة الذاتية لا تعتمد على نصف قطر الموصل بتاتاً.

2-2-3 المحاثة الخارجية Lo لموصل منفرد

لكي نحسب المحاثة الخارجية لموصل منفرد معين سنتأمل الشكل3-4 الذي يوضح نقطتين P1 و P2 تقعان على مسافتي D1 و D2 من موصل ذي نصف قطر r يحمل تيار مقداره I أمبير. ولما كانت خطوط الفيض المغناطيسي هي عبارة دوائر متحدة المركز حول الموصل نفسه فإن الفيض كله بين النقطتين P1 و P2 سوف يقع ضمن سطوح اسطوانية متحدة المركز تمر من خلال هاتين النقطتين بحيث تكون شدة المجال على المسافة x :

$$H_x = \frac{I}{2\pi x} \quad AT/m \qquad (3.13)$$



الشكل 3- 4 الفيض المرتبط بين نقطتين P1 و P2 خارج موصل حامل للتيار.

وتكون كثافة الفيض بالويبر / المتر المربع

$$B_x = \mu_0 . H_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \quad W/m^2 \qquad (3.14)$$

يلاحظ من الشكل 3-4 أن الفيض خارج الموصل يرتبط مع كل تيـار الموصـل I نفسه، وعليه فان ترابط الفيض يساوي الفيض نفسه $d\emptyset_x$ بالقيمة. فإذا إذا أخذنا كميات جزئية صغيرة من الفيض ذات قيمة $d\emptyset_x$ ويبر لمنطقة صغيرة جداً بعرض dx وبطول متر واحد من الموصل فإن قيمته تكون:

$$d\emptyset_x = B_x . d_x . 1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}\, dx \qquad (3.15)$$

وبأخذ تكامل المعادلة أعلاه لإيجاد ترابط الفيض ينتج:

$$\text{الفيض المرتبط} = \lambda = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\mu_0 I}{2\pi x}\, dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi} ln \frac{D_2}{D_1} \;\; W.T/m$$

عليه فإن المحاثة بين نقطتين خارج الموصل يمكن إيجادها بقسمة الفيض المرتبط على التيار الكلي حيث تكون :

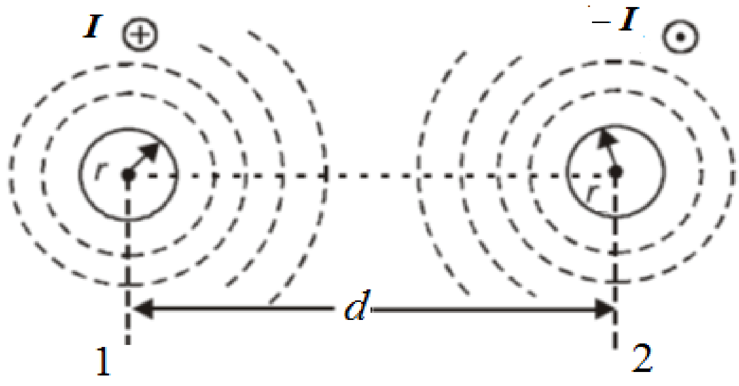
$$L_o = \frac{\text{الفيض المرتبط}}{\text{التيار } I} == \frac{\lambda}{I} = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\mu_0}{2\pi x}\, dx = \frac{\mu_0}{2\pi} ln \frac{D_2}{D_1} \;\; H/m \qquad (3.16)$$

$$L_o = 2 \times 10^{-7} ln \frac{D_2}{D_1} \; H/m \qquad (3.17)$$

3-3 الخط ذو السلكين Two-wire Line

يعد خط النقل ذي السلكين أو الخط الأحادي الطور الموضح في الشكل 3-5 نقطة مناسبة للإنطلاق بتحليلاتنا لإيجاد محاثة الخطوط الهوائية المعلقة. في البداية سندرس المجال المغناطيسي المتكون بواسطة كل سلك على إنفراد لكي نجد إسهامه في قيمة محاثة الدائرة المتكونة من هذين السلكين. وبما أن كل موصل يكوِن أنصاف أقطار متساوية من الفيض فان كلاً منهما سيساهم في نصف قيمة محاثة الدائرة، والشكل3-5 المذكور يبين المسارات الدائرية النموذجية التي تتبعها خطوط الفيض بسبب مرور تيار متناوب مقداره I في السلك رقم 1 التي تكون خارجية بالنسبة له.

بإهمال التيارالراجع I - في السلك رقم 2 مؤقتاً فانه ليس من الممكن إعتبار نصف قطر السلك r صغيراً إلى حد الإهمال بحيث أن التيار يجري في فتيلة على طول محوره. وعلى أساس هذا الفرض فان الفيض المرتبط مع الدائرة المتكونة من السلكين 1و2 بسبب التيار I المار في السلك 1 يكون بموجب المعادلة (3.8) كالآتي :

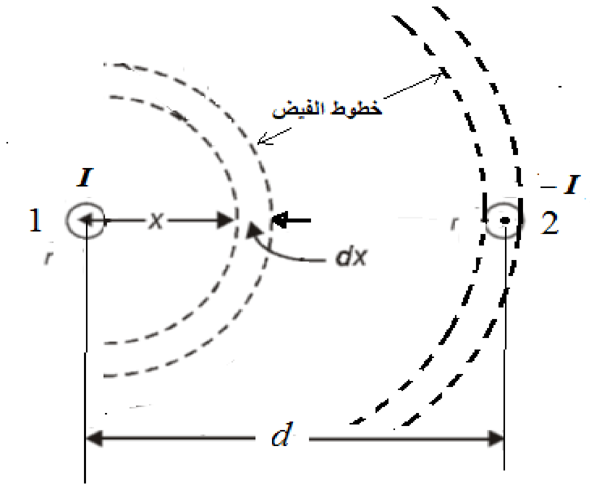


الشكل 3-5 خط أحادي الطور ذي السلكين.

$$\frac{\mu_o I}{2\pi}\int_o^d \frac{dx}{x}$$

هذا الفيض تكون قيمته غير محددة. لذلك يجب علينا أن نحسب المحاثة الكلية لكل متر من هذا الخط بعد أن نفرق بين المحاثة الناجمة عن المجال المغناطيسي المتولد داخل الموصلات نفسها والتي سميناها في الفقرة السابقة بالمحاثة الداخلية Li، وبين المحاثة Lo الناتجة عن المجال المغناطيسي المتولد خارج الموصلات والناتجتان كلتاهما عن مرورتيار في كلا الموصلين بحيث أن المحاثة الكلية تكون عبارة عن مجموعهما الجبري ، أي أن : L= Li + Lo .

يلاحظ من الشكل 3-6 أن الفيض الناتج عن مرور تيار في الموصل رقم 1 يرتبط مع كل تيـار الموصل I نفسه وذلك لقيم المسافة x المحصورة بين r و$(d-r)$.



الشكل 3-6 خطوط ترابط الفيض الناتجة عن الموصل رقم 1 لوحده في خط أحادي الطورذو سلكين.

أما بالنسبة للمسافة x المحصورة بين: $(d-r) < x < (d+r)$ فان جزء التيارالمرتبط يتناقص من I إلى صفر. فاذا اُفترض أن الفيض المتولد كله يرتبط مع كل التيار I للمسافة من r إلى d ولا يوجد أي تيارمن d الى$(d+r)$ فبالنسبة للمسافة $d \gg r$ سيكون هناك خطأ قليل جداً في حساب المحاثة الخارجية المؤثرة L_e وغالباً ما نستخدم هذه الفرضية في حساباتنا.

إن الفيض المتولد عن التيار I المار في الموصل رقم 1 في مسافة حلقية ضئيلة ذات نصف قطر قدره x وعرض شعاعي dx وطول محوري 1 متر حيث أن $x > r$ يمكن إيجاده من المعادلة (3.8) على أنه $\mu_o Idx/2\pi x$.هذا الفيض يفترض أن يرتبط مع تيار I فى دائرة ذات لفة واحد ة بالنسبة للمسافة $r < x < d$ لذلك من المعادلة (3.7) يكون مقدار المحاثة الخارجية المؤثرة L_o :

$$L_o = \frac{\mu_o}{2\pi}\int_r^d \frac{dx}{x} = \frac{\mu_o}{2\pi} ln\frac{d}{r} \;\; H/m \qquad (3.18)$$

أما مجموع المحاثتان $L_i + L_o$ فيعطي محاثة الدائرة الكلية التي يسببها التيار I المار في الموصل رقم 1. وبما اننا افترضنا سلفاً أن أنصاف أقطار الموصلات متساوية فان التيار I- المار في الموصل رقم 2 سيولد قوة دافعة مغناطيسية (ق. د. مغ) مشابهة بالضبط للقوة الدافعة المغناطيسية للموصل رقم 1 وتكونان بالطور نفسه. ولدائرة أو حلقة أحادية الطور لها محاثة كلية قيمتها $2(L_i + L_o)$ هنري/ متر من مسارها، فان نصف هذه القيمة يمكن إعتبارها كونها المحاثة لكل موصل واحد وكالآتي:

$$(L_i + L_o) \; = L = 2\times 10^{-7} \left[ln\left(\frac{d}{r}\right) + \frac{1}{4}\right] \;\; H/m \qquad (3.19)$$

$$L = 2\times 10^{-7} \left[ln\left(\frac{d}{r}\right) + e^{\frac{1}{4}}\right] = 2\times 10^{-7} \left[ln\left(\frac{d}{re^{-\frac{1}{4}}}\right)\right] \; \frac{H}{m} \qquad (3.20)$$

هذا التعبير الرياضي من الممكن استعماله إما:

(أ) لإيجاد المحاثة لموصل واحد لكل متر من طول المسار: يستعمل هنا الطول الفعلي لموصل واحد أوطول المسار نفسه.

(ب) لإيجاد محاثة الدائرة كلها المتضمنة كلا الموصلين الذاهب والراجع لكل متر من طول الدارة الذي يقاس حول الدارة نفسها. ويستعمل هنا طول الدارة والذي هوضعف طول مسارالخط الواحد بحيث نتمكن من إعادة كتابة المعادلة (3.18) بالصيغة التالية:

$$L = 2 \times 10^{-7}\ ln\frac{d}{r_m} \qquad H/m \tag{3.21}$$

حيث تم استعمال نصف قطر محوري r_m في هذه المعادلة قيمته $r_m = re^{-\frac{1}{4}}$. ونصف القطر هذا يدعى بمتوسط نصف القطر الهندسي للموصل (م.نق.هـ) أومتوسط البعد الهندسي الذاتي (م.ب.هـ الذاتي). وبالمقارنة مع المعادلة (3.18) يتبين ان r_m يمكن إعتباره نصف القطر المؤثر للموصل والذي يمكن إهمال ترابط الفيض الداخلي له. وإذا كان الموصل يتألف من عدة سلاك مجدولة مع بعضها فيمكن إثبات أن متوسط نصف القطر الهندسي لجديلة مفردة مقطعها العرضي دائري الشكل وموضوعة في الهواء الذي إنفاذيته النسبية المؤثرة مقدارها μ_0 يكون:

$$r_m = re^{-\mu_0/4} \tag{3.22}$$

وبالتأمل في المعادلة (3.21) نستطيع أن نستنتج أن محاثة الموصل رقم 1:

$$L_1 = 2 \times 10^{-7}\ ln\frac{1}{r_m} + 2 \times 10^{-7}\ ln\frac{d}{1} \tag{3.23}$$

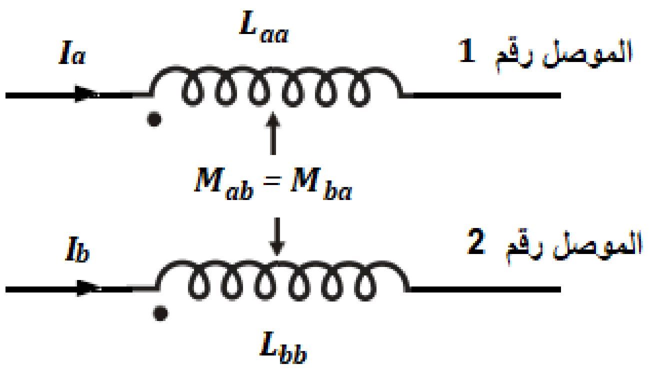
وبالإسلوب نفسه تكون محاثة الموصل رقم 2:

$$L_2 = 2 \times 10^{-7}\ ln\frac{1}{r_m} + 2 \times 10^{-7}\ ln\frac{d}{1} \tag{3.24}$$

4-3 المحاثة الذاتية للخطوط والمحاثة التبادلية بين الخطوط

بالنسبة للخط ذي السلكين المبين في الشكل 3-5 الذي تمت مناقشته في الفقرة 3-3 السابقة يمكن إيجاد المحاثة الخاصة به لكل طور بدلالة المحاثة الذاتية للموصل رقم 1 والمحاثة التبادلية الناتجة عن تأثير الفيض المغناطيسي لموصل رقم 2 . بداية لنتأمل الملفين الموضحين في الشكل 3-7 الذان لهما محاثتان ذاتيتان L_{aa} و L_{bb} على التعاقب ومحاثة تبادلية بينهما M_{ab} .

إذا إفترضنا الآن أن الخط الأحادي الطور ذي الموصلين ينظر اليه وكأنه يتمثل بالملفين في الشكل 3-7 المتقرنين مغناطيسياً بحيث أن القطبية المغناطيسية تكون كما موضحة برمزالنقاط الغامقة على بداية الملفين.



الشكل 3-7 الخط الأحادي الطور ذي الموصلين ينظر اليه وكأنه عبارة عن ملفين متقارنين مغناطيسياً.

عليه فإن الفيضين المترابطين λ_a و λ_b بين الملفين:

$$\lambda_a = L_{aa} I_a + M_{ab} I_b \qquad (3.25)$$

$$\lambda_b = M_{ba} I_a + L_{bb} I_b \qquad (3.26)$$

ولما كان $I_a = -I_b$

نحصل على

$$\lambda_a = (L_{aa} - M_{ab}) I_a \qquad (3.27)$$

$$\lambda_b = (-M_{ba} + L_{bb}) I_b \qquad (3.28)$$

لذا يمكننا أن نكتب:

$$L_a = L_{aa} - M_{ab} \qquad (3.29)$$

$$L_b = -M_{ba} + L_{bb} \qquad (3.30)$$

وبمقارنة المعادلتين (3.29) و (3.30) مع المعادلتين (3.24) و (3.25) نجد أن

$$L_{aa} = L_{bb} = 2 \times 10^{-7}\ ln \frac{1}{r_m} \quad H/m \qquad (3.31)$$

$$M_{ab} = M_{ba} = 2 \times 10^{-7}\ ln \frac{1}{d} \quad H/m \qquad (3.32)$$

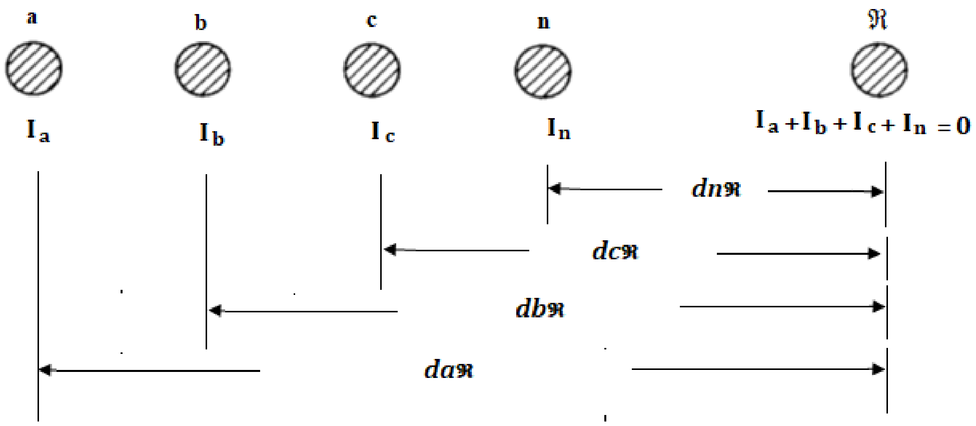
من المعادلتين (3.31) و (3.32) أعلاه من الممكن أن نسمي كل من L_{aa} و L_{bb} بالمحاثة الذاتية للموصل رقم 1 والموصل رقم 2 على التعاقب، ونسمي كل من M_{ab} و M_{ba} المحاثتان التبادليتان للموصلين 1 و 2 على التعاقب.

5-3 نظام نقل عام ذو موصلات متعددة General Multi-Conductor System

بصورة عامة تكون معظم خطوط نقل القدرة متعددة الموصلات (الأسلاك)، أي قد تكون ذات ثلاثة أو أربع موصلات إذا كانت دائرة واحدة ثلاثية الأطوار. أو قد تكون متألفة من دائرتين ثلاثيتي الأطوار منقولة على نفس البرج (ست موصلات). عليه فإن معظم أنظمة النقل ذات الأسلاك أو الموصلات المتعددة التي سيتم التطرق اليها هنا هي عبارة عن دائرة واحدة ذات ثلاثة خطوط نقل (ثلاثية الطور a-b-c) بحيث أن كل خط مخصص لنقل طور واحد فقط . وقد تكون الأنظمة أيضا ذات أربعة أسلاك إذا تم فيها استخدام الخط الرابع كسلك محايد (Neutral)، أي أن اهتمامنا سيكون بالأنظمة ذات الموصلات الثلاثة أوالأربعة بصورة رئيسية. كذلك سوف لا نتطرق في هذا الفصل بتفصيل كبير إلى التأثيرات المتبادلة بين الدوائر الثنائية ذات الخطوط الثلائية الطور أوبين خطوط نقل القدرة والدوائر الأخرى؛ مثلاً التداخل مع خطوط الهاتف إن وجدت. وخطوط النقل ذات المواصلات الحزمية التي يكون لكل طور فيها أكثر من موصل واحد. ويقصد بالتداخل هنا هو تولد إشارات أو فولتيات ذات تردد 50 هرتز في دوائر مثل خطوط هاتف تسير بالقرب من خطوط علوية معلقة (هوائية) لنقل القدرة كون أن خطوط الهاتف هذه لم يعد لها استخدام في الوقت الحاضر بظهور الأتصالات الحديثة بواسطة الأقمار الصناعية.

لنتبصر الآن بخط نقل ثلاثي الطورمن النوع المثبت في العراء (خط هوائي) مع سلك رابع هو سلك المحايد n كما مبين في الشكل 3-8، وإذا كان هناك سلك خامس وهو الأرضي متواجد على خط النقل؛ وكان من الممكن إهمال تأثيره فإن مجموع هذه التيارات الأربعة يكون صفراً، أي:

$$I_a + I_b + I_c + I_n = 0$$



الشكل 3-8 خط ثلاثي الطور ذو دائرة أحادية مع سلك محايد وموصل راجع مشترك وهمي.

وإذا أعتبرنا أن $\Re$ موصل مرجع وهمي (افتراضي) فان كلا من التيارات الاربعة يمكن ان نتصوره وكأنه يدورفي دائرة ذات لفة واحدة، فمثلا يدور التيار I_a في السلكين a و $\Re$, ويدور I_b في b و$\Re$ ...الخ. بما ان التيارفي $\Re$ سيكون صفرا في كل الأوقات فهو موصل خيالي ذوموضع أختياري نسبة إلى الموصلات الحقيقية. وبما أن كل الدوائر لها لفة واحدة فقط فان ترابط الفيض مع أية دائرة يكون مساوياً للفيض المرتبط مع تلك الدائرة، فمثلا يرتبط الفيض Φ_a الناشئ عن التيار I_a مع الدائرة المتألفة من السلكين a و $\Re$. عليه فمن المعادلتين (3.7) و (3.18) يكون الفيض المرتبط مع الدائرة المتألفة من a و $\Re$ بسبب التيار I_a المار فى الوصل a هو:

$$\Phi_a' = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi} ln \frac{d_{aR}}{r_m} \quad Wb/m \qquad (3.33)$$

حيث أن r_m هو متوسط نصف القطر الهندسي لكل الموصلات ذات الاطوار الثلاثة؛ والموصل المحايد له م.نق.هـ مقداره r_m' .

أما الفيض Φ_a'' المرتبط مع الدائرة نفسها بسبب سريان التيار I_b في الموصل b، فانه ينشأ كخطوط فيض مغناطيسية دائرية الشكل يتحد مركزها مع محور الموصل b باعتباره مركزاً لهذه الخطوط وبين أنصاف الأقطار d_{ab} و d_{bR} بحيث أن قيمته تحسب من المعادلة التالية :

$$\Phi_a'' = \frac{\mu_0}{2\pi} I_b \, ln \frac{d_{bR}}{d_{ab}} \quad Wb/m \qquad (3.34)$$

وبجمع المعادلتين (3.33) و (3.34) مع اضافة مساهمة الفيضين الذين يسببهما كل من التيارين I_c و I_n نحصل على قيمة جـم.ت الكلية للفيض المرتبط مع دائرة a و $\Re$ حيث تكون

$$\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a ln \frac{d_{aR}}{r_m} + I_b ln \frac{d_{bR}}{d_{ab}} + I_c ln \frac{d_{cR}}{d_{ac}} + I_n ln \frac{d_{nR}}{d_{an}}\right) \qquad (3.35)$$

وبتبسيط هذه المعادلة نستطيع كتابتها بالشكل التالي:

$$\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a ln \frac{1}{r_m} + I_b ln \frac{1}{d_{ab}} + I_c ln \frac{1}{d_{ac}} + I_n ln \frac{1}{d_{an}} + I_a ln\, d_{a\Re} + I_b ln d_{b\Re} + I_c ln d_{c\Re} + I_n ln d_{n\Re}\right) \qquad (3.36)$$

وبتعويض $I_n = -(I_a + I_b + I_c)$ في الحد الاخير في المعادلة (3.36) نحصل على

$$\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a\, ln\frac{1}{r_m} + I_b ln\frac{1}{d_{ab}} + I_c ln\frac{1}{d_{ac}} + I_n ln\frac{1}{d_{an}} + I_a ln\frac{d_{aR}}{d_{n\Re}} + I_b ln\frac{d_{bR}}{d_{n\Re}} + I_c ln\frac{d_{cR}}{d_{n\Re}}\right) \qquad (3.37)$$

وبما ان الموصل الوهمي $\Re$ ليس له معنى فيزياوي في الحقيقة فان موقعه سيكون اختيارياً وعندما يبتعد أكثر عن الموصلات الحقيقية فإن كلاً من الحدود الثلاثة الأخيرة في المعاد نة (3.37) تقترب من الصفر ، لأنه عندما يكون $\Re$ واقع على مسافة بعيدة جداً عن الموصلات (في اللانهاية) فستكون الموصلات الأربعة على بعد متساوٍ منه تقريبا. لذلك فان Φ_a الذي يمثل الفيض المرتبط مع الموصل a سيصبح :

$$\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a ln\frac{1}{r_m} + I_b ln\frac{1}{d_{ab}} + I_c ln\frac{1}{d_{ac}} + I_n ln\frac{1}{d_{an}}\right) \qquad (3.38)$$

في المعادلة أعلاه إذا غيرنا تسمية r_m التي هي متوسط البعد الهندسي الذاتي للموصل a نفسه إلى d_{aa} فسيكون هناك توافق في الترميز السفلي المزدوج لقيم المقامات في الحدود اللوغارتمية الطبيعية للمعادلة (3.38) السالفة. أما الفيوض المرتبطة مع الموصلات الأخرى فيمكن الحصول عليها بالأسلوب نفسه وكما يأتي:

للحصول على Φ_b قم بكتابة الحرف b بدل الحرف a في المعادلة (3.38) . و للحصول على Φ_c قم بكتابة الحرف c بدل الحرف a في المعادلة (3.38) وهكذا، ينتج لدينا المعادلات الثلاثة المتبقية التالية:

$$\Phi_b = \frac{\mu_o}{2\pi}(I_a ln\frac{1}{d_{ba}} + I_b ln\frac{1}{r_m} + I_c ln\frac{1}{d_{bc}} + I_n ln\frac{1}{d_{bn}})$$

$$\Phi_c = \frac{\mu_o}{2\pi}(I_a ln\frac{1}{d_{ca}} + I_b ln\frac{1}{d_{cb}} + I_c ln\frac{1}{r_m} + I_n ln\frac{1}{d_{cn}})$$

$$\Phi_n = \frac{\mu_o}{2\pi}(I_a ln\frac{1}{d_{na}} + I_b ln\frac{1}{d_{nb}} + I_c ln\frac{1}{d_{nc}} + I_n ln\frac{1}{r'_m})$$

هذه المعادلات الأربع الناتجة لـفيوض Φ_a و Φ_b و Φ_c و Φ_n التي كانت المعادلة (3.38) هي الاولى فيها يمكن إعادة كتابتها بصورة اكثر ملائمة على هيئة مصفوفة كما في المعادلة (3.39) بدلاً من معادلات منفصلة كتلك المعطاة في أعلاه .

$$\begin{bmatrix}\Phi_a\\ \Phi_b\\ \Phi_c\\ \Phi_n\end{bmatrix} = \frac{\mu_o}{2\pi} ln \begin{bmatrix}\frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{ab}} & \frac{1}{d_{ac}} & \frac{1}{d_{an}}\\ \frac{1}{d_{ba}} & \frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{bc}} & \frac{1}{d_{bn}}\\ \frac{1}{d_{ca}} & \frac{1}{d_{cb}} & \frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{cn}}\\ \frac{1}{d_{na}} & \frac{1}{d_{nb}} & \frac{1}{d_{nc}} & \frac{1}{r\grave{}_m}\end{bmatrix} \begin{bmatrix}I_a\\ I_b\\ I_c\\ I_n\end{bmatrix} \qquad (3.39)$$

مما يجب ملاحظته هنا أن الفيض المترابط مع كل موصل من الموصلات الأربعة يكون جزء منه متسبب عن التيار المار في ذلك الموصل (أي تاثيرالمحاثة الذاتية) وأجزاء أخرى تسببها التيارات المارة في الموصلات المجاورة (تاثير المحاثة التبادلية). أما العناصر االواقعة في قطر المصفوفة (العناصر القطرية) التي هي:

$$\frac{1}{r\grave{}_m} ، \frac{1}{r_m} ، \frac{1}{r_m} ، \frac{1}{r_m}$$

والتي يمكن كتابتها كما ياتي

$$\frac{1}{d_{nn}} ، \frac{1}{d_{aa}} ، \frac{1}{d_{bb}} ، \frac{1}{d_{cc}}$$

فان قيم هذه العناصر تمثل تاثيرات المحاثات الذاتية، وبقية العناصرفتمثل تاثيرات المحاثة التبادلية.

لما كان افتراضنا أن Φ_a هو ذلك الفيض المرتبط مع الدائرة المتألفة من الموصل a والموصل $\Re$ ولما كان هذا الموصل الأخير ليس له حقيقة فيزياوية، عليه فالمحاثة الذاتية للدائرة $a\Re$ يمكن أن نسميها بالمحاثة الذاتية للموصل a وهذه يرمز لها بالرمز L_{aa} . وبالإسلوب نفسه فالمحاثة التبادلية بين الدوائر $a\Re$ و $b\Re$ يمكن أن نسميها بالمحاثة التبادلية L_{ab} بين الموصلين a و b.

إن معاملات المصفوفة المعطاة في (3.39) تكون متماثلة حول قطرها إذا فرضنا أن المنافذة للدائرة المغناطيسية μ تكون ثابتةً. وهذا الشرط متوفر بالنسبة للموصلات المصنوعة من مواد غير مغناطيسية وموضوعة في الهواء، فالمحاثة التبادلية بين دائرتين تكون في هذه الحالة تبادلية حقيقية، وهذا

يعني تساوي جميع المحاثات التبادلية مع بعضها البعض، أي أن $L_{ab} = L_{ba}$ و $L_{ac} = L_{ca}$ .... الخ. وبما أن كل موصلين من خط النقل يؤلفان بصورة فعلية دائرة ذات لفة مفردة، فان المعادلة (3.39) يمكن كتابتها من المعادلة (3.7) باستعمال القيم L_{aa} و L_{bb} ...الخ رموزاً للمحاثة الذاتية وأيضا L_{ab} و L_{bc} ...الخ رموزاً للمحاثة التبادلية لنحصل على المعادلة (3.40) وكما يلي:

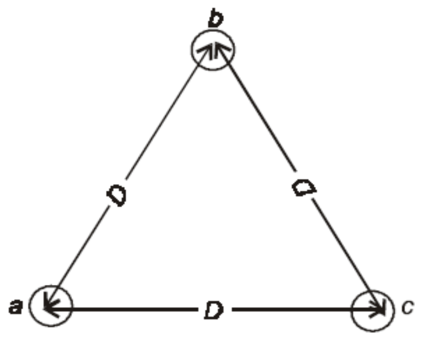
$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \\ \Phi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{an} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bn} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_{cc} & L_{cn} \\ L_{an} & L_{bn} & L_{bc} & L_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

ويجب هنا أن تتم ملاحظة التماثل الكائن في حدود المحاثة الذاتية على قطر المصفوفة أعلاه.

وهنا يجب الإشارة إلى أنه في أغلب خطوط النقل، يكون السلك المحايد n سلكاً أرضياً هوائياً يمرفوق موصلات الأطوار الثلاثة لكى يوفر بعض الحماية من الصواعق المباشرة، عليه يجب أن لايؤخذ تأثيره في إحتساب محاثة الخطوط نفسها. على هذا الأساس سنناقش في الفقرات التالية منظومة ثلاثية الطور تحتوي على ثلاث موصلات بحيث إننا سنهمل تأثير الموصل المحايد n كما في الشكل 3-8.

3-6 محاثة خط نقل ثلاثي الطور متماثل التباعد

الشكل 3-9 يبين خط نقل ثلاثي الطور متماثل التباعد. الموصلات الثلاثة لها أنصاف أقطار متساوية مقدار كل منها *r* متر. وتأثير الموصل المحايد n مهمل تماماً.



الشكل 3-9 محاثة خط نقل ثلاثي الطور متماثل التباعد.

فإذا أهملنا تأثير تيار المحايد In فان Φ_a الذي يمثل الفيض المرتبط مع الموصل a من المعادلة (3.38) سيصبح :

$$\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a ln\frac{1}{r_m} + I_b ln\frac{1}{d_{ab}} + I_c ln\frac{1}{d_{ac}}\right)$$

وإذا فرضنا أن المنظومة الثلاثية الطور متوازنة بحيث أن

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad \Rightarrow \quad I_a = -(I_b + I_c)$$

$$\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a ln\frac{1}{r_m} - I_a ln\frac{1}{D}\right)$$

$$\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a ln\frac{D}{r_m}\right)$$

هذا الفيض يترابط مع الموصل a لذا فإن محاثته ستكون هذا الفيض المترابط مقسوم على التيار أي أن :

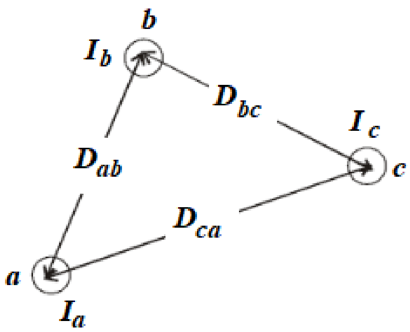
$$L_a = \frac{\Phi_a}{I_a} = \frac{\mu_o}{2\pi} ln\frac{D}{r_m} \qquad (3.41)$$

وبسبب التماثل في المنظومة نستنتج أن

$$L_a = L_b = L_c = 2 \times 10^{-7} ln\frac{D}{r_m} \qquad (3.42)$$

3-7محاثة خط نقل ثلاثي الطور غير متماثل التباعد

في الواقع العملي فإن خطوط النقل عموماً التي تنقل منظومات ثلاثية الطور يكون التباعد بين موصلاتها غير متماثل كما موضح في الشكل 3- 10. أي انها لا تقع في زوايا مثلث متساوي الأضلاع. عليه فإن ترابط الفيض ومحاثات الخطوط الثلاثة سوف تكون متساوية حتى وإن كانت التيارات الثلاثة متوازنة. هذا الوضع سيؤدي إلى أن فولتيات طرف الإستلام للأطوار الثلاثة سوف لا تصل متساوية حتى وإن كانت فولتيات طرف الإرسال متساوية.



الشكل 3-10 خط نقل ثلاثي الطور بتباعد غير متماثل للموصلات.

على هذا الأساس وبموجب المعادلة (3.38) ستكون محاثات الخطوط الثلاثة كالآتي:

$$\lambda_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a ln\frac{1}{r_m} + I_b ln\frac{1}{d_{ab}} + I_c ln\frac{1}{d_{ac}}\right) \qquad (3.43)$$

$$\lambda_b = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a ln\frac{1}{d_{ba}} + I_b ln\frac{1}{r_m} + I_c ln\frac{1}{d_{bc}}\right) \qquad (3.44)$$

$$\lambda_c = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a ln\frac{1}{d_{ca}} + I_b ln\frac{1}{d_{cb}} + I_c ln\frac{1}{r_m}\right) \qquad (3.45)$$

وبصيغة المصفوفة تصبح المعادلات الثلاثة أعلاه

$$\begin{bmatrix}\lambda_a\\ \lambda_b\\ \lambda_c\end{bmatrix} = \frac{\mu_o}{2\pi}\begin{bmatrix} ln\frac{1}{r_m} & ln\frac{1}{d_{ab}} & ln\frac{1}{d_{ac}} \\ ln\frac{1}{d_{ba}} & ln\frac{1}{r_m} & ln\frac{1}{d_{bc}} \\ ln\frac{1}{d_{ca}} & ln\frac{1}{d_{cb}} & ln\frac{1}{r_m}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_a\\ I_b\\ I_c\end{bmatrix} \qquad (3.46)$$

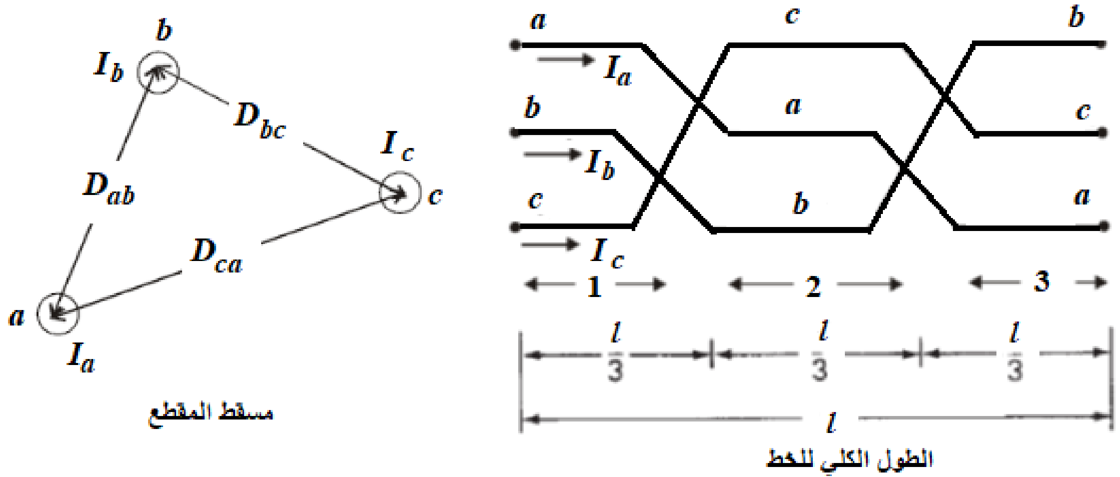
عليه فإن مصفوفة المحاثة المتماثلة ستكون:

$$\boldsymbol{L} = \frac{\mu_o}{2\pi}\begin{bmatrix} ln\frac{1}{r_m} & ln\frac{1}{d_{ab}} & ln\frac{1}{d_{ac}} \\ ln\frac{1}{d_{ba}} & ln\frac{1}{r_m} & ln\frac{1}{d_{bc}} \\ ln\frac{1}{d_{ca}} & ln\frac{1}{d_{cb}} & ln\frac{1}{r_m}\end{bmatrix} \qquad (3.47)$$

8-3 محاثة التتابع الموجب أوالسالب لخط ثلاثة الطوار ذي دائرة أحادية مبدلة الموضع

Positive or Negative-sequence Inductance of Transposed Single-circuit 3-phase Line

إذا كان خط النقل له مسار طويل بصورة كافية وحدث هناك عدم توازن كبير في قيم المحاثة (والسعة) بين الأطوار الثلاثة فمن الممكن في هذه الحالة إبدال مواضع الأطوار الثلاثة مع بعضها البعض لغرض تقليل محاثة الخط . في هذ ه العملية يتم تبادل مواضع موصلات الأطوار عند أبراج خاصة تصمم لذلك بحيث أن موصل كل طور يشغل كلاً من المواضع الثلاثة 1 و2 و3 لكل مسافة الثلث من طول الخط تقريبا وكما موضح فى شكل 3-11 هذه العملية تضيف كلفة إلى الخط لكن هذه الكلفة يمكن تبريرها بتقليل المفاقيد الكبيرة الناجمة عن المحاثة والسعة وخاصة للخطوط الطويلة.



الشكل 3-11 ثلاث موصلات تتبادل في الموضع لخط ثلاثي الطور طويل.

في حالة تطبيق نظام تبادل المواضع هذا فإن ترابط الفيض ϕ_a لكل مترطول من مسار الموصل، ولنأخذ موصل الطور a مثلا، يمكن أن نجده من المعادلة (3.38) بحيث أن المسافات الجديدة يجب ان تكتب الآن على انها d_{12} و d_{23} و d_{13} بدلاً من d_{ab} و d_{bc} و d_{ac}. وبما أن هذه المسافات تكون متغيره لذا يكون ترابط الفيض للموصل a كالآتي :

$$\phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\frac{1}{3}(I_a ln\frac{1}{r_m} + I_b ln\frac{1}{d_{13}} + I_c ln\frac{1}{d_{12}} + I_a ln\frac{1}{r_m} + I_b ln\frac{1}{d_{23}} + I_c ln\frac{1}{d_{13}} + I_a ln\frac{1}{r_m} + I_b ln\frac{1}{d_{12}} + I_c ln\frac{1}{d_{23}})$$

$$= \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a ln\frac{1}{r_m} + (I_b + I_c) ln\frac{1}{\sqrt[3]{(d_{12}d_{23}d_{13})}}\right) \qquad (3.48)$$

واذا افترضنا عدم وجود خط أرضي في النظام بحيث تجري تيارات التتابع الموجب والسالب فقط فان $(I_b + I_c) = -I_a$ وعليه سيكون الفيض المترابط $\phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi} I_a ln\frac{D_m}{r_m}$ ، حيث ان الكمية : $D_m = \sqrt[3]{(d_{12}d_{23}d_{13})}$ تدعى بمتوسط المباعدة أوالبعد االهند سي بين الموصلات .

وهكذا فالمحاثة الذاتية المؤثرة لكل موصل طوري لخط ذي ثلاثة اطوار، تكون نفسها لكلا تياري التتابع الموجب والسالب تكون كما يلي

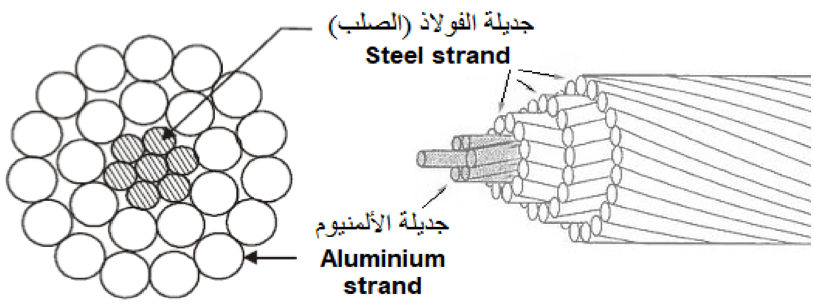
$$L = \frac{\mu_o}{2\pi} ln\frac{D_m}{r_m} \qquad (3.49)$$

هذا التعبير الرياضي للمحاثة يمكن استعماله بصورة عامة حتى إذا لم يتم إبدال مواضع الخط، وبما أن الأسلوب الشائع في الحياة العملية هو قلة استخدام طريقة تبديل المواضع ، فإن الإختلاف بين قيم المحاثات الذاتية $L`_{aa}$ و $L`_{bb}$ و $L`_{cc}$ يكون صغيراً بحيث يمكن أخذ القيمة التقريبية التي تعطيها المعادلة (3.49) كمعدل لقيم $L`_{aa}$ و $L`_{bb}$ و $L`_{cc}$. وبما ان نسبة D_m/r_m تكون بحدود 300 الى 400 للخطوط ذات الفولتية العالية جداً فان المحاثة تكون حوالي 1.2 ملي هنري لكل كيلومتر طول بالنسبة لكل من الموصلات الثلاثة للخط الثلاثي الطور.

9-3 موصلات الخطوط المجدولة والخطوط ذات اللب الفولاذي

Stranded and Steel-cored Line Conductors

لقد افترضنا في كافة تحليلاتنا في الفقرات السابقة أن موصلات الخطوط التي مر ذكرها سلفا تكون من النوع الصلد أو المصمت Solid conductors . لكن هذا النوع من الموصلات يكون التعامل معه صعباً في الحياة العملية خاصة كلما إزدادت مساحة المقطع العرضي له لزيادة حمله للتيارات. لذلك تصنع الموصلات عادة من أسلاك متعددة تكون جديلة (ضفيرة) واحدة Strand من مادة غير مغناطيسية مثل الألمنيوم أو النحاس. وتكون موصلات الألمنيوم في الحقيقة غير متجانسة لأنها غالباً ما تحتوي على جديلة من مادة الفولاذ (الصلب) لغرض تقويتها لكي تتحمل قوى الشد العالية عند تعليقها بين الأبراج ذات التباعد الكبير. لذلك تستعمل موصلات من الألمنيوم ذي اللب الفولاذي الذي هو الأكثر إستعمالاً ويتألف هذا النوع من الموصلات من جديلة من الأسلاك الفولاذية ملفوفة مع طبقات متبادلة، ملوية باتجاهات متعاكسة مكونة اللب الذي تلف عليه جديلة من أسلاك الألمنيوم بصورة متبادلة وملوية أيضاً، يطلق عليه أسم Aluminum Cable Steel Reinforced (ACSR) ، أنظر الشكل 12-3.



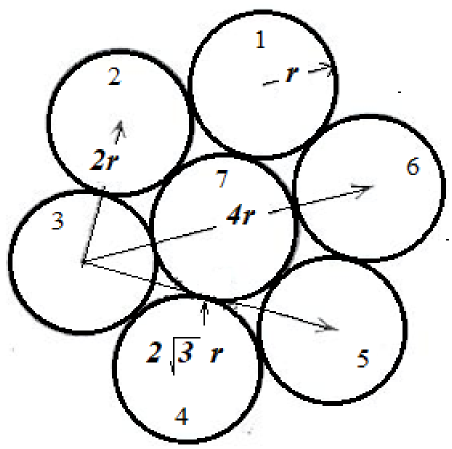
الشكل 12-3 منظر لموصل نوع ACSR ولمقطع عرضي منه ذي جديلة تحتوي على 7 أسلاك من الحديد الصلب (الفولاذ) وجديلة تحتوي 24 سلك ألمنيوم.

عندما يكون موصل طور متألفاً من جديلة تحتوي عدد n من الأسلاك غير المغناطيسية المتماثلة وكل منها يفترض أن يحمل التيار نفسه. عندئذ يكتب ترابط الفيض لكل جديلة. آخذين معدل المحاثة لجديلة واحدة، ومن ثم نربطها جميعا على التوازي لتعطي معدل المحاثة لكل موصل طور والذي اعطيت قيمته بالمعادلة (3.49). ومن ناحية أخرى، فان متوسط البعد الهندسي (م.ب.هـ) D_m يمكن كتابة صيغته الرياضية الآن بوصفه مساوياً لجذر من الدرجة n^2 لحاصل ضرب المسافات من كل الجدائل التي عددها n لموصل طور واحد إلى كل الجدائل التي عددها n أيضا لموصل الطور الآخر. وإذا كانت موصلات الأطوار الثلاثة ليست موزعة على زوايا بشكل مثلث متساوي الاضلاع، فان أخذ جذر من الدرجة n^2 لكل زوج سوف يعطي ثلاث مسافات مختلفة وستكون قيمة D_m هي الجذر التكعيبي لحاصل ضرب هذه المسافات كالسابق.

إن متوسط نصف القطر الهندسي (م. نق. هـ) أو متوسط البعد الهندسي (م. ب. هـ) الذاتي بين الجدائل المكونة للموصل سوف لا يكون $re^{-\frac{1}{2}}$, أي $0.779\,r$ كما هي بالنسة لجديلة غير مغناطيسية مفردة . فبدلاً من ذلك سيكون الجذر من الدرجة n^2 لحاصل ضرب كل الجدائل n في موصل واحد، ذي (م.نق.هـ) $r_m = 0.779r$ لكل جديلة مضروباً بالمسافات من تلك الجديلة إلى كل جديلة من الجدائل الأخريات في الموصل نفسه.

وهذه موضحة بالنسبة لموصلات النحاس أو الألمنيوم ذات 7 جدائل المبينة في الشكل 3-13 حيث أن متوسط نصف القطر الهندسي (م. نق. هـ) هو:

$$r_m' = \sqrt[49]{([r_m(2r)^3\ \ (2\sqrt{3}r)^2 4r]^6 [r_m(2r)^6])}$$



الشكل 3-13 مقطع لموصل مجدول ذي سبعة أسلاك.

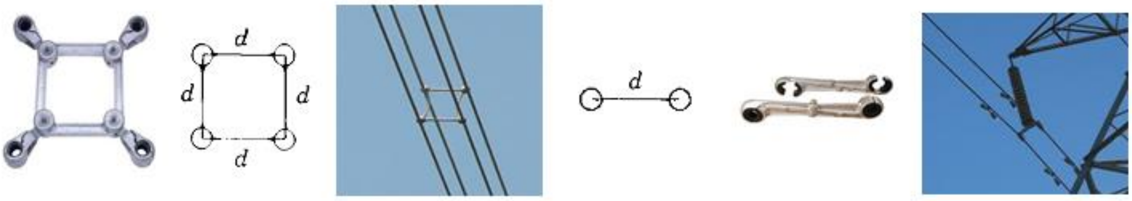
$$r_m^{'} = r\sqrt[49]{(2^{48} \times 3^6 \times 0.779^7)}$$

$$r_m^{'} = 2.177r$$

أي أن (م. نق. هـ) لهذا الموصل سيكون 0.7255 × نصف القطر الكلي. وكلما ازداد عدد الأسلاك في الجدائل تقترب النسبة من القيمة 0.779 والتي هي للموصل المصمت.

10-3 الموصلات الحزمية او المتعددة الأسلاك Bundle or Multiple Conductors

بسبب التوسع في منظومات الشبكات ذات الفولتية العالية فقد تم التوجه لإستعمال موصلات متعددة محزومة. والموصلات المحزومة أو الحزمية هي تلك الموصلات التي يكون لكل طورفيها موصلان أو أكثر. فمثلا منظومة 275 كيلو فولت لها موصلان البعد بينهما 30 سنتمتر وخطوط 400 كيلوفولت لها أربعة موصلات لكل طور، وتكون في رؤوس مربع طول ضلعه 30 سنتمتر .أنظر الشكل 3-14.



الشكل 3-14 تماذج من الوصلات الحزمية الثنائية والرباعية.

وتستخدم الموصلات الحزمية هذه للأسباب التالية:

- تقليل الخسائرالتي تسببها ظاهرة الهالة (Corona)
- تقليل التداخل الراديوي مع خطوط الاتصالات
- تقليل القدرة الضائعة
- تقليل محاثة الخط بسبب زيادة قيمة (م. نق. هـ) المؤثر أو متوسط البعد الهندسي الذاتي لكل طور.

وكما أنه تم التطرق في الفقرة السابقة إلى كيفية حساب متوسط نصف القطر الهندسي (م. نق. هـ) لكل موصل من الموصلات الألمنيوم ذات القلب الفولاذي فإنه بالطريقة نفسها يمكن إيجاد (م. نق. هـ) المؤثر للموصلات المخزومة لكل طور. فمثلاً لو كان كل طورله موصلان ولكل منهما (م. نق. هـ) مقداره $r_m^{`}$ متر ، وهذان الموصلان يبعدان عن بعضهما بمسافة S متر، فأن (م.نق.هـ) سيكون $\sqrt{(r_m^{`}S)}$. وبما ان مقدار S يتراوح بين 15 الى 20 مرة بقدر نصف قطر الموصل فأن (م.نق. هـ) يزداد بعامل مقداره حوالي 4 مرات. وإذا استعملنا أربعة موصلات لكل طور عند رؤوس مربع طول ضلعه S فأن (م.نق.هـ) يكون

$$\text{نق.هـ.م} = \sqrt[4]{(r_m^{`} \times S \times S \times \sqrt{2S})} \simeq 8r_m^{`}$$

ومحاثة التتابع الموجب لكل طور من خط له موصلان في الطور الواحد يمكن حسابها من المعادلة (3.49) حيث تكون:

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi} ln \frac{D_m}{\sqrt{(r_m^{`} S)}} \qquad (3.50)$$

واذا فرضنا أن هناك خط ذي موصل واحد يناظر أو يكافئ هذا الخط المحزوم وبنفس المسافة D_m لكل طور (يعني له مساحة المقطع العرضي الكلية نفسها) آنئذ سيكون للأخير محاثة مقدارها

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi} ln \frac{D_m}{\sqrt{2r_m^{`}}} \qquad (3.51)$$

وبطرح (3.50) من (3.51) نحصل على

$$\frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{\sqrt{(r_m^{`} S)}}{\sqrt{2r_m^{`}}}$$

من هنا نجد أن نسبة التقليل في قيمة المحاثة باستخدام الموصلات الحزمية إلى تلك للموصل المفرد (كنسبة مئوية) تكون

$$\frac{ln \frac{\sqrt{(r_m^{`} S)}}{\sqrt{2r_m^{`}}}}{ln \frac{D_m}{\sqrt{2r_m^{`}}}} \times 100$$

وإذا تم حساب هذا التقليل لخط 275 كيلو فولت له موصلان قطر كل منهما 2 سنتمتر مبعدين عن بعضهما بمسافة 30 سنتمتر ومعدل المسافة بين الأطوار مقدارها 7 سنتمتر فان التقليل في المحاثة للخط يكون حوالي 20% .

عندما وجدنا المعادلة (3.49) افترضنا أن D_m لخط ذي موصلين لكل طور كانت نفسها كما أنها لخط ذي موصل واحد فقط لكل طور. هذا الفرض في الواقع مقارب جداً للحقيقة، إلا أن D_m يجب أن تحسب كما يأتي:

$$D_m = \sqrt[3]{(d_{ab} d_{ac} d_{bc})}$$

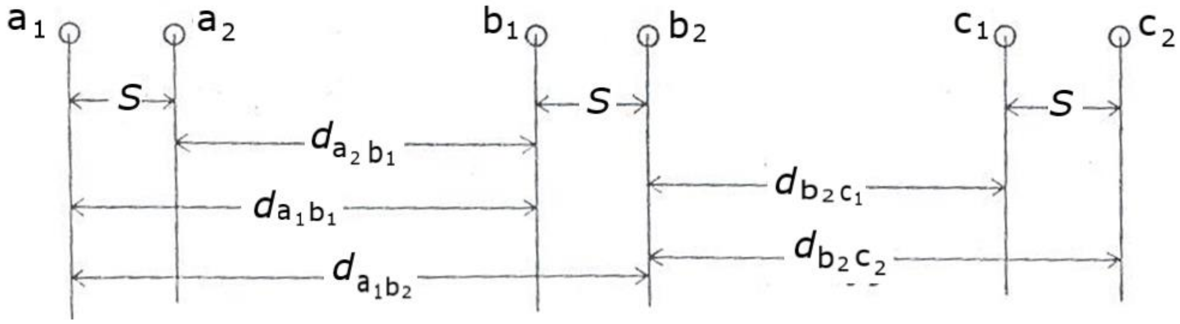
حيث أن

$$d_{ab} = \sqrt[4]{(d_{a1b1}d_{a1b2}d_{a2b1}d_{a2b2})}$$

$$d_{ac} = \sqrt[4]{(d_{a1c1}d_{a1c2}d_{a2c1}d_{a2c2})}$$

$$d_{bc} = \sqrt[4]{(d_{b1c1}d_{b1c2}d_{b2c1}d_{b2c2})}$$

حيث أن d_{a1b1} و d_{a1b2} هما التباعد بين الموصلات للأطوار المختلفة و كما موضح في الشكل 3-15. ولغرض التبسيط في الحسابات تم تبيان الموصلات وكانها جميعا في مستوٍ أفقي واحد.



شكل 3-15 خط ذودائرة أحادية له موصلان في كل طور في مستو أفقي واحد.

الفصل الرابع

متسعة خط النقل

TRANSMISSION LINE CAPACITANCE

1-4 مقدمة

وجدنا في الفصل الثالث أن المقاومة R والمحاثة L لأي خط هما العنصران اللذان يكونان ممانعة التوالي للخط Z. أما السعة أو المتسعة C ، التي نحن بصدد دراستها، سوية مع المواصلة G فتكونان سماحية الخط Y . والمتسعة تعد مصدراً للقدرة المتفاعلة في الخطوط وتتناسب هذه القدرة تناسباً طردياً مع مربع الفولتية المستخدمة على الخط، عليه فإنه كلما زادت الفولتية العاملة للخط زاد تأثير المتسعة وأصبح شاغلا أساسيا لمهندسي النظم ونقل الطاقة.

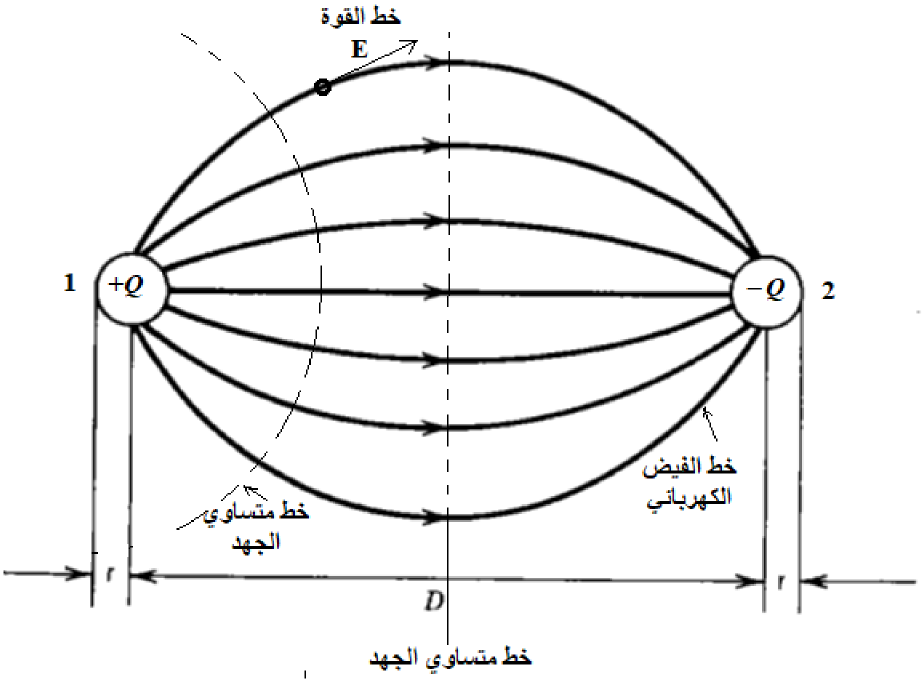
لو تأملنا في خط نقل بسيط له موصلين اثنين العازل بينهما هواء، فسوف يكونان متسعة، وعند ربط هذين الموصلين إلى مصدر فولتية متناوب فسيمر بهذه المتسعة تيار شحن. هذا التيار يجري حتى في حالة كون الخط غير محمل (في ظروف اللاحمل)، ويكون تيار الشحن هذا له قيمة عظمى في طرف الإرسال، ويضمحل إلى الصفر عند طرف الاستلام. والمتسعة تعد حملاً على الخط ذا عامل متقدم وتأثيرها على أداء الحالة المستقرة للخط قد تمت مناقشته في الفصل الثاني. ولو اعتبرنا الآن أن هذين الموصلين يكونان دائرة أحادية الطور أو خط أحادي الطور فسيكون من الأبسط دراسة المتسعة لهذا الخط اولاً ومن ثم التدرج بدراسة الخطوط الأكثر تعقيدا.

2-4 المجال الكهربائي وفرق الجهد

قبل الشروع بدراسة متسعة الخطوط يجب الرجوع إلى بعض المفاهيم الفيزيائية التي تفيدنا في إيجاد معادلات المتسعة. من المعروف أن أي موصل حامل للتيار يولد حوله مجالاً كهربائياً. هذا المجال مصدره هو الشحنات الكهربائية التي تكون متوزعة على سطح الموصل نفسه. وتنشا خطوط المجال من الشحنات الموجبة وتنتهي عند الشحنات السالبة. إن قيمة المتسعة الناتجة بين الموصلات سوف تكون معتمدة على قطر الموصل r والمسافة بين الموصلات وارتفاع الموصل عن مستوى سطح الأرض. وتعرف المتسعة عموما كونها معدل كمية الشحنة الموجودة على الخطوط مقسوم على فرق الجهد بينها.

ولتبيان هذه المفاهيم بصورة أوضح، وللمساعدة في تصور توزيع المجال الكهربائي ضمن خط نقل يحتوي على موصلين إثنين مشحونين بشحنتين مختلفتين Q+ و Q- كما مبين في الشكل 4-1. ولنفرض الآن أن كلاً من الموصلين عبارة عن موصل صلد أسطواني، وأفرض أن هذا الموصل عليه شحنة موجبة

متجانسة موزعة بانتظام على طوله وكان معزولاً بصورة تامة بحيث أن الشحنة الموجودة عليه تتوزع بانتظام على محيطه الدائري. في هذه الحالة سوف تتولد خطوط الفيض الكهربائي بصورة شعاعية (مع اتجاه نصف قطر الموصل) حيث تتكون هناك خطوط متساوية الجهد عمودية على خطوط الفيض الكهربائي. هذه الخطوط المتساوية في الجهد تكون عبارة عن أسطوانات متحدة المركز تحيط بالموصل نفسه. إن أي زوج من خطوط الفيض الكهربائي سوف يحتوي على كمية محدودة من الفيض بحيث أنه لو أخذنا أية نقطة في المجال نستطيع أن نعين كثافة المجال الكهربائي فيها ولتكن D. وتعتبر هذه الكثافة كمية متجهة أي لها مقدار واتجاه.



1-4 المجال الكهربائي بين موصلات خط يحتوي على موصلين إثنين.

وطبقاً لنظرية كاوس Gauss التي تنص على أنه في أية لحظة من الزمن يكون الفيض الكهربائي الكلي المتولد ضمن أي سطح مغلق A مساوياً للشحنة الكلية (مجموع الشحنة) التي يحيط بها ذلك السطح. أي أنه إذا كانت D_n هي كثافة الفيض التي تكون عمودية على جزء من مساحة مقدارها da فإن:

$$\oint D_n \, da = \sum Q$$

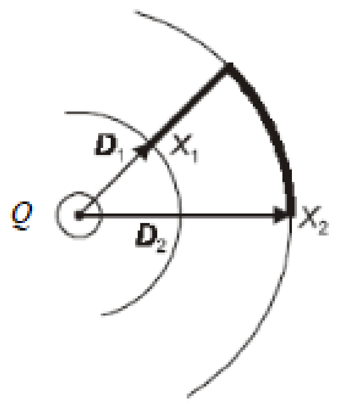
وتمثل $\sum Q$ المجموع الصافي لجميع الشحنات التي يحيط بها السطح؛ وعلى هذا الأساس فإن كثافة الفيض الكهربائي D يمكن قياسها بالكولومب / المتر المربع.

في كل نقطة ضمن المجال الكهربائي هناك قوة كهربائية E تسمى شدة المجال الكهربائي وهي كمية متجهة مقاسة بالفولت لكل متر. وينجز شغل معين عندما تتحرك شحنة قياسية ضد القوة E. كذلك تسمى E بتدرج الجهد، لأن $E_x = -\partial V/\partial x$ حيث أن ∂x تعبر عن تحرك الشحنة ضمن جزء ضئيل من المسافة، والإشارة السالبة تعني حقيقة أنه إذا ازدادت x بالابتعاد عن موصل مشحون بشحنة موجبة، فان الجهد يقل بحيث أن $\partial V/\partial x$ تكون سالبة عندما E تكون موجبة نظراً لأن الشحنة الموجبة تسلط عليها قوة باتجاه معاكس للموصل ذي الشحنة الموجبة. وطبقا لنظرية كاوس فان شدة المجال الكهربائي E المتولد على مسافة y من الموصل تكون قيمتها معطاة بالمعادلة:

$$E_y = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o y} \qquad (4.1)$$

حيث Q هي الشحنة الموجودة على الموصل لكل متر، y هي المسافة بالمتر، ϵ_o هي سماحية الهواء وتساوي 8.85×10^{-12} فاراد/متر.

ألان إذا اخذنا نقطتين x_1 و x_2 خارج موصل مستقيم طويل مشحون على بعدين D_1 و D_2 على التوالي من مركزه (هنا D تعبر عن المسافة وليست كثافة المجال الكهربائي) ، كما مبين في الشكل 2-4 ، عندئذ يكون فرق الجهد العددي بين الموضعين أو الاسطوانتين D_1 و D_2 مساوياً إلى الشغل المنجز لتحريك وحدة الشحنة التي قيمتها كولومب واحد خلال المجال الكهربائي الناتج عن شحن الموصل ، عليه فان



الشكل 2-4 المجال الكهربائي لموصل مستقيم طويل.

$$V_{12} = \int_{D_1}^{D_2} E_y\, dy = \int_{D_1}^{D_2} \frac{Q}{2\pi\epsilon_o y}\, dy$$

$$= \frac{Q}{2\pi\epsilon_o y}\, ln\frac{D_2}{D_1} Volts \qquad (4.2)$$

حيث أن V_{12} هو الفولتية في النقطة x_1 نسبة الى الفولتية في النقطة x_2 ويكون موجبا إذا كانت الشحنة Q موجبة . كذلك إذا كانت D_2 اكبر من D_1 فان النقطة x_1 يكون الجهد عندها أكبر من الجهد في x_2 .

وإذا كان هناك عدد من الموصلات المتوازية المستقيمة الطويلة في الهواء، وبفرض أن شحناتها تكون موزعة بانتظام على سطوحها (هذا يعني أن مسافاتها من بعضها ومن الأرض هي كبيرة مقارنة بأنصاف أقطارها) فإن الجهد عند نقاط تبعد بمسافات x_3 و x_2 و x_1 ..الخ من محاور الموصلات والتي تحمل شحنات خط Q_1 و Q_2 و Q_3 ...الخ لكل وحدة طول يمكن أن يكتب وفق المعادلة (4.3) كما يلي

$$V_x = -\frac{1}{2\pi\epsilon_o}[Q_1 ln x_1 + Q_2 ln x_2 + Q_3 ln x_3 + ..] + K. \qquad (4.3)$$

حيث K هو ثابت اختياري يعتمد على اختيار قيمة x التي عندها تكون قيمة الجهد صفرا.

وبالتشابه فالجهد عند نقاط اخرى تبتعد بمسافات $y_1, y_2, y_3,$ و...الخ من شحنات الخط يكون

$$V_y = -\frac{1}{2\pi\epsilon_o}[Q_1 ln y_1 + Q_2 ln y_2 + Q_3 ln y_3 + ..] + K. \qquad (4.4)$$

أي أن جهد x نسبة إلى جهد y سيكون

$$V_{xy} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[Q_1 ln\frac{y_1}{x_1} + Q_2 ln\frac{y_2}{x_2} + Q_3 ln\frac{y_3}{x_3} + \cdots\right] \qquad (4.5)$$

3-4 خط ذو سلكين Two-wire Line

إذا كان هناك سلكان موصلان فقط يحملان شحنتين Q+ و Q- على التوالي فعندئذ تعطي المعادلة (4.3) الجهد الكهربائي عند أية نقطة في المجال تبعد x_2 و x_1 من الشحنتين وكما يأتي:

$$V = -\frac{1}{2\pi\epsilon_o}(Q ln x_1 - Q ln x_2) = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} ln\frac{x_2}{x_1} \qquad (4.6)$$

وعند نقطة بعيدة جداً (أي تقع في اللانهاية) ففي المعادلة (4.3) تكون $x_1 = x_2$ و $V = 0$ ولذلك تكون $K = 0$. لاحظ في المعادلة (4.6) أن المسافتين x_1 و x_2 يجب أن تكونان أكبر من أنصاف أقطار الموصلات نفسها، لأنه عندما تكون كل من x_1 أو x_2 أقل من نصف قطر الموصل r

يكون الجهد ثابتاً، في حين أن المعادلة (4.6) تعطيه كمتغير. وإذا كانت $x_1 = 0$ فتصبح قيمة الجهد تصبح لانهائية.

بالتأمل في المخطط الذي في الشكل 4-1، هذا المخطط يمكن أن يساعدنا أيضاً في تصور توزيع المجال الكهربائي بين موصلي الخط ذو السلكين حيث أن كل زوج من خطوط الفيض سيحتوي على كمية محدودة من الفيض الكهربائي، وتكون الخطوط المتساوية الجهد في القيم التي تكون النسبة x_2/x_1 تساوي كمية ثابتة، والخطوط المتساوية الجهد تكون عمودية على خطوط الفيض (منظومة متعامدة). أما الموصلات فلا يمكن أخذها بوصفها خطوط مشحونة ذات أنصاف أقطار متناهية الصغر لأن المعادلة (4.6) تطبق فقط عندما تكون $x > r$.

وإذا فرضنا أن الشكل 4-3 يمثل موصلين طويلين متوازيين 1 و2 وكل منهما له نصف قطر r متر موضحان في الشكل على أن محوريهما يبعدان عن بعضهما بمسافة d متر؛ فإذا كانت هناك شحنة مقدارها Q على الموصل رقم 1 فقط ولا توجد شحنة على الموصل رقم 2 وكان الموصل رقم 2 نحيف جداً (متناهي في الصغر) ، فإن الخطوط متساوية الجهد ستكون عبارة عن دوائر متحدة المركز مع محور الموصل 1 . وبما أن الموصل 2 هو موصل معدني ذو نصف قطر محدود r فسوف يشوش المجال لأنه يدخل في منطقة عرضها $2r$ بين الخطوط المتساوية الجهد التي تكون جميعها ذات جهد واحد . هذا الجهد من الممكن ان يؤخذ بانه ذلك الخط المتساوي الجهد الدائري الذي سيمر من خلال محور الموصل 2 فيما لو رفع من المجال أو أعتبر نحيفا جدا. وعند مسافة تبلغ عدة أنصاف اقطار من الموصل المحدود فإن الخط المتساوي الجهد هذا سيصبح دائرة متحدة المركز مع محور الموصل رقم 1 ويبتعد عنه بمسافة d.



الشكل 4-3 خط ذو سلكين.

بما أن فرق الجهد بين نقطتين يكون مساوياً إلى الشغل المنجز في تحريك وحدة شحنة إحدى النقطتين إلى الأخرى فإنه لا يعتمد على الطريق المأخوذ ضمن المجال الكهربائي بين النقطتين . ففرق الجهد للموصل رقم 1 نسبة الى الموصل رقم 2 سيكون V_{12} . والذي يمكن إيجاده بأخذ تكامل المعادلة (4.1) بين سطح الموصل رقم 1 حيث أن $x = r$ الى $x = 2$ للشحنة مع اضافة المساهمة المشابهة من الشحنة Q- على الموصل 2 بدلاً عن ذلك. فمن أدلة المعادلة (4.6) وبجعل $x_1 = r$ و $x_2 = d,$ يكون

فرق جهد الموصل رقم 1 هو V_1 بسبب شحنته +Q لكل وحدة طول و –Q على الموصل رقم 2 وكما مبين بالمعادلة التالية

$$V_1 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} ln\frac{d}{r} \qquad (4.7)$$

وجهد الموصل رقم 2 ، (V_2) ، بسبب كلتا الشحنتين سيكون

$$V_2 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} ln\frac{r}{d}$$

لذ لك يكون فرق الجهد V_{12}

$$V_{12} = V_1 - V_2 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} ln\frac{d^2}{r^2} = \frac{Q}{\pi\epsilon_o} ln\frac{d}{r} \qquad (4.8)$$

وهذه هي القيمة المعطاة بالمعادلة (4.5) نفسها إذا اعتبرنا أن البعد x_1 إلى الموصل 1 من شحنته هي نصف قطره، و أن y_2 مسافة الموصل 2 من شحنته هي نصف قطره أيضاً، عليه فالمتسعة C لكل متر طول بين الموصلين تكون :

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \frac{\pi\epsilon_o}{ln\ d/r} \quad F/m \qquad (4.9)$$

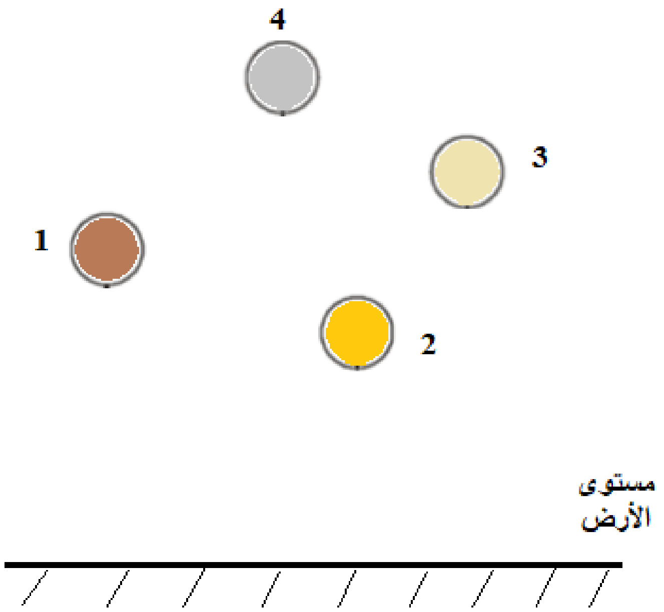
يلاحظ عند تطبيق المعادلة (4.9) أعلاه على خط نقل فعلي هناك بعض التقريبات التي يراعى أخذها بعين الاعتبار وهي:

(أ) تم فرض أن توزيع الشحنة على سطح موصل الخط كونها منتظمة. وهذا الفرض يكون حقيقيا على وجه الدقة فقط عندما تكون كل الاجسام المشحونة الاخرى قد ابعدت إلى اللانهاية. أي أن تأثير نصف قطر الخط يصبح ضئيلاً عند ما تزداد النسبة d/r . ولخطوط النقل ذات الفولتيات العالية غالباً ما تكون نسبة المسافة لأقرب موصل إلى نصف قطره بحدود 300 الى 400. عليه فان مقدار الخطأ في حساب السعة سيكون صغيراً الى حد يمكن إهماله.

(ب) تم استعمال المسافة d بين مركزي الموصلين على إنها أحد حدي التكامل بدل من $(d-r)$. وهذه يمكن تبريرها مرة اخرى عندما تكون $d \gg r$.

4-4 منظومة متعددة الموصلات -عامة General Multi-conductor

لو كان لدينا عدد من الموصلات المفردة تسير بصورة متوازية مع بعضها وموازية لمستوٍ أرضي ذي توصيل تام كما مبين في شكل 4-4 بحيث يؤخذ جهد مستوى الأرض على أنه يساوي صفر. وإذا كانت الموصلات غير مشحونة في البداية فهي كذلك تكون ذات جهد يساوي صفر. وإذا أخذنا شحنة Q_1 من مستوى الأرض إلى الموصل رقم 1 فعندئذ سيكون جهد كل الموصلات يتناسباً مع Q_1 . وبأخذ الحرف p على أنه ثابت تناسب فسيكون جهد الموصل 1 نسبة إلى الأرض هو $V'_{10} = p_{11}Q_1$ ، بينما ستكون جهود جميع الموصلات الأخرى نسبة إلى الأرض هي $V'_{20} = p_{21}Q_1$ و $V'_{30} = p_{31}Q_1$ وهكذا. ووحدات الثابت p هذا ستكون فولت / كولومب أي إنه مقلوب وحدة المتسعة.



الشكل 4-4 منظومة متعددة الموصلات ذات 4 موصلات فقط.

وبالتشابه إذا نقلنا Q_2 من الأرض إلى الموصل رقم 2 فجهد الموصل 1 نسبة إلى الأرض سيرتفع بـ $V''_{10} = p_{12}Q_2$ وجهد الموصل 2 نسبة إلى الأرض سيرتفع بـ $V''_{20} = p_{22}Q_2$ وهكذا، لذلك إذا نقلنا الشحنات Q_1 و Q_2 و Q_3 و Q_4 بالتتابع من الأرض إلى الموصلات 1 و 2 و 3 و 4 ، حينئذ سترتفع جهود الموصلات نسبة إلى الأرض إلى المقادير:

$$V_{10} = p_{11}Q_1 + p_{12}Q_2 + p_{13}Q_3 + p_{14}Q_4$$

$$V_{20} = p_{21}Q_1 + p_{22}Q_2 + p_{23}Q_3 + p_{24}Q_4$$

$$V_{30} = p_{31}Q_1 + p_{32}Q_2 + p_{33}Q_3 + p_{34}Q_4$$

$$V_{40} = p_{41}Q_1 + p_{42}Q_2 + p_{43}Q_3 + p_{44}Q_4$$

ويمكن كتابة المعادلات أعلاه بصيغة مصفوفة بصورة أكثر وضوحا وكما يأتي:

$$\begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ V_{30} \\ V_{40} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} \qquad (4.10)$$

بشكل عام تكون المعاملات p ثوابت لوضعية معينة لأنها تعتمد فقط على ترتيب الموصلات مع بعضها ومع مستوى الأرض ، وهذا يمكن أن نراه بمقارنة المعادلة (4.10) مع المعادلة (4.5). وإذا عكسنا مصفوفة معاملات p في المعادلة (4.10) (أي أنه يتم حل المعادلات لكي تعطي Q بدلالة V) فسنحصل على مجموعة معاملات أخرى التي تكون معتمدة على حجم وموضع الموصلات مرة أخرى فقط. هذه المعاملات الجديدة ستكون لها وحدات سعة وكالآتي:

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ V_{30} \\ V_{40} \end{bmatrix} \qquad (4.11)$$

بما ان الطاقة المخزونة في المجال الكهربائي لا تعتمد على الترتيب الذي ينجز به الشغل لتحريك هذه الشحنات عندما يتم نقلها من نقطة إلى أخرى، عندئذ ستكون الثوابت $p_{12} = p_{21}$ متساوية. والسعات كذلك $c_{12} = c_{21}$ متساوية أيضاً، أي أن المصفوفات في (4.10) و (4.11) تكون متماثلة حول القطر (الأيسر الأعلى إلى الأيمن الاسفل). ولخط ثلاثة أطوار ذي دائرة مفردة يحتوي على موصل رابع بوصفه خطاً أرضياً؛ عندئذ يمكن إعادة كتابة المعادلة الاولى في (4.11) للموصلات الثلاثة كما يأتي:

$$Q_1 = (c_{11} + c_{12} + c_{13} + c_{14})V_{10} - c_{12}(V_{10} - V_{20}) - c_{13}(V_{10} - V_{30}) - c_{14}(V_{10} - V_{40})$$

$$Q_1 = C_1 V_{10} + C_{12} V_{12} + C_{13} V_{13} + C_{14} V_{14} \qquad (4.12$$

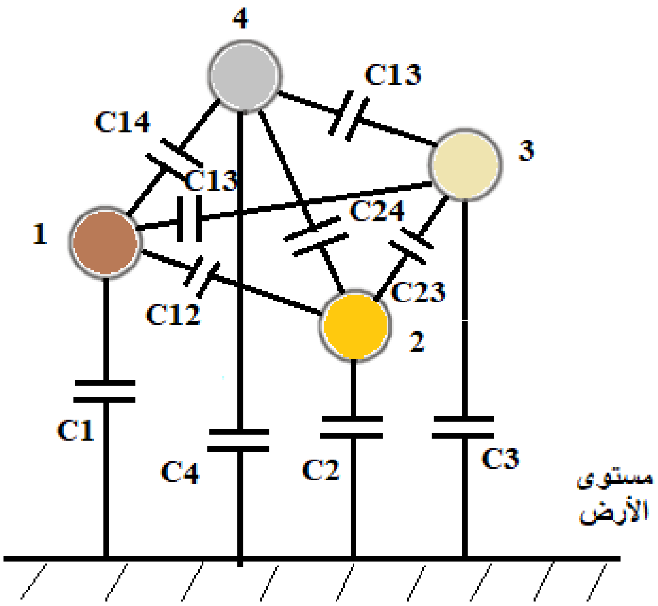
حيث أن $C_1 = (C_{11} + C_{12} + C_{13} + C_{14})$

كذلك $C_{12} = -c_{12}$

وبالتشابه $Q_2 = C_{12}V_{21} + C_2V_{20} + C_{23}V_{23} + C_{24}V_{24}$

حيث أن $C_2 = (c_{21} + c_{22} + c_{23} + c_{24})$

وبالأسلوب نفسه يمكن كتابة Q_3 و Q_4 على هذا النمط. هذه المعادلات الأربع هي لتلك المنظومة من السعات المبينة في شكل4-5. فالموصل 1 مثلاً ستكون شحنته مؤلفة من أربع مركبات في (4.12) المركبة الأولى هي فرق الجهد بين الموصل نفسه والأرض مضروباً بسعة C_1 إلى الأرض ، وثلاث مركبات كل منها حاصل ضرب فرق الجهد بين الموصل نفسه وموصل آخر مضروباً بالسعة بين هذين الموصلين.



الشكل 4-5 المتسعات بين الموصلات والأرض.

4-5 تأثير الأرض Effect of Earth

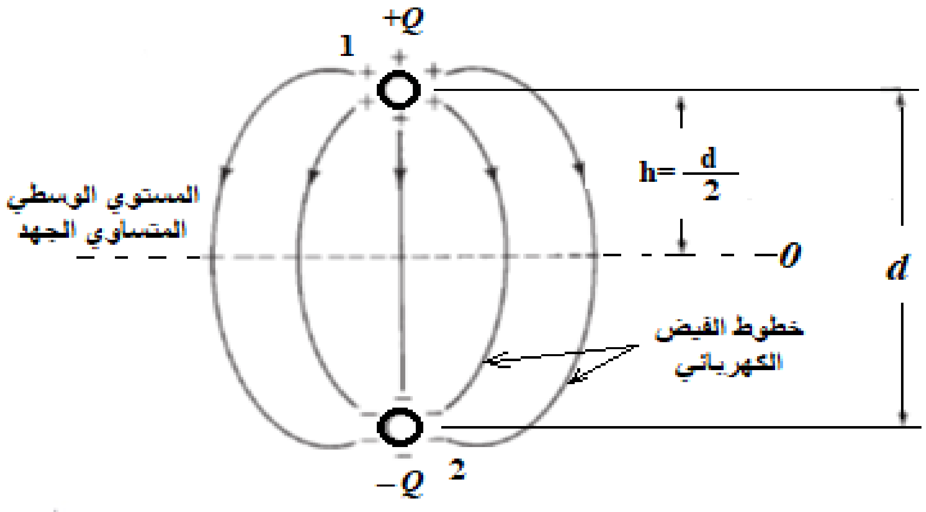
إذا أدخلنا صفيحة موصلة رقيقة في منتصف المسافة بين موصلين أسطوانيين متشابهين في الهواء يحملان شحنتين $\pm Q$ وكانت هذه الصفيحة متعامدة مع الخط الذي يربط بين مركزيهما وكما مبين في الشكل 4-6 وبما أن هذه الصفيحة تمثل مستوى متساوي الجهد قبل وضعها هناك فسوف لا تسبب في اضطراب المجال الكهربائي وتشويهه. ومن المعادلة (4.5) سيكون فرق الجهد V_{10} بين الموصل 1 والصفيحة الموصلة 0 سيكون:

$$V_{10} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}(Q_1 log_e \frac{y_1}{x_1} + Q_2 log_e \frac{y_2}{x_2})$$

حيث y_1 و y_2 هما المسافتان من أية نقطة على المستوى الموصل إلى محاور الموصلين الحاملين للشحنتين Q_1 و Q_2 وهاتان تكونان متساويتين لكل النقاط على المستوي المذكور، أي أن

$$Q_1 = +Q \quad \text{و} \quad Q_2 = -Q$$

و x_1 هي المسافة من محور الموصل 1 إلى شحنته والتي تم بيانها على أنها مسارية إلى نصف قطره (أنظر المعادلة (4.8)) و x_2 هي المسافة من محور الموصل 1 الى محور الموصل 2 , أي أن $x_2 = d$.



الشكل 4-6 المستوي المتساو الجهد الوسطي بين موصلي خط ذي طور واحد ، ومستوى الأرض مع صورة الشحنة لموصل خط واحد.

والمتسعة من موصل خط معزول هوائياً إلى مستوى موصل يقع أسفل منه بمسافة h متر تكون:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_o}{ln\frac{2h}{r}} \qquad (4.13)$$

4- 6 خط عام ثلاثي الطور ذو دائرة مفردة General Single-circuit 3-phase Line

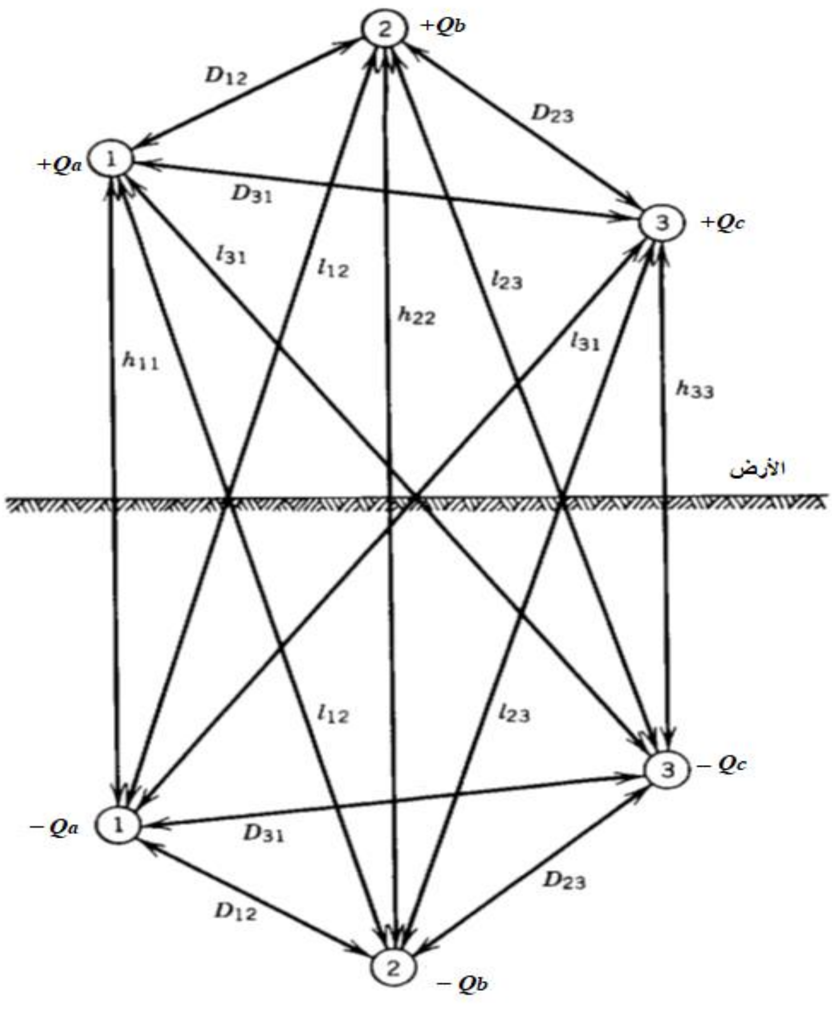
الشكل 4-7 يبين خطاً ثلاثي الطور ذا دائرة مفردة بدون موصل أرضي وكل من الخطوط الثلاثة a و b و c له موصل صورة يحمل شحنة مساوية ومعاكسة. المسافة بين موصل الطور وصورته هي ضعف ارتفاع الموصل فوق الأرض، مثلا $d_{aa`} = 2h_a$ ...الخ

وبما أن موصلات الأطوار لها نصف القطر r نفسه، فبالتماثل يمكننا أن نجد أن المسافات $d_{ab`} = d_{ba`}$ متساوية. وباعتبار أن جهد الأرض صفراً فجهد الموصل، ولنأخذ موصل الطور a مثلاً، يكون ناتج عن:

1) الشحنتين Q_a و $-Q_a$ على a و $a`$.

2) الشحنتين Q_b و $-Q_b$ على b و $b`$.

3) الشحنتين Q_c و $-Q_c$ على c و $c`$.



الشكل 4-7 خط ثلاثي الطور ذو دائرة مفردة مع شحنات صورة.

ومساهمة الموصل رقم (1) يمكن ان نجدها من المعادلة (4.13) تكون

$$\frac{Q_a}{2\pi\epsilon_o} ln \frac{h_{11}}{r}$$

ومساهمة الموصل (2) :

$$\frac{Q_b}{2\pi\epsilon_o} ln \frac{l_{12}}{D_{12}}$$

ومساهمة الموصل (3) هي

$$\frac{Q_c}{2\pi\epsilon_o} ln \frac{l_{31}}{D_{13}}$$

وهكذا فجهد موصل الطور a نسبة إلى الأرض يكون

$$V_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[Q_a ln \frac{h_{11}}{r} + Q_b ln \frac{l_{12}}{D_{12}} + Q_c ln \frac{l_{31}}{D_{13}}\right] \tag{4.14}$$

وبالتشابه

$$V_b = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[Q_a ln \frac{l_{12}}{D_{12}} + Q_b ln \frac{h_{22}}{r} + Q_c ln \frac{l_{23}}{D_{23}}\right] \tag{4.15}$$

وكذا فان

$$V_c = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[Q_a ln \frac{l_{13}}{D_{13}} + Q_b ln \frac{l_{23}}{D_{23}} + Q_c ln \frac{h_{33}}{r}\right] \tag{4.16}$$

وبإعادة كتابة المعادلات اعلاه بصيغة مصفوفة، فالتماثل الذي يحصل سيمكننا من إدخال تأثير سلك أرضي ذي نصف قطر r_e وارتفاع h_e فوق الأرض كما يأتي :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_{e=0} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} ln \begin{bmatrix} \frac{h_{11}}{r} & \frac{l_{12}}{D_{12}} & \frac{l_{13}}{D_{13}} & \frac{l_{1e`}}{D_{1e}} \\ \frac{l_{12}}{D_{12}} & \frac{h_{22}}{r} & \frac{l_{13}}{D_{23}} & \frac{l_{2e`}}{D_{2e}} \\ \frac{l_{13}}{D_{13}} & \frac{l_{23}}{D_{23}} & \frac{h_{33}}{r} & \frac{l_{3e`}}{D_{3e}} \\ \frac{l_{1e`}}{D_{1e}} & \frac{l_{2e`}}{D_{2e}} & \frac{l_{3e`}}{D_{3e}} & \frac{h_{ee}}{r_e} \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ Q_e \end{bmatrix} \qquad (4.17)$$

وهذا يعني أنه يمكننا أن نكتب المعادلة أعلاه بالصيغة

$$[V] = [p].[Q]$$

$$[Q] = [p]^{-1}[V] = [c].[V]$$

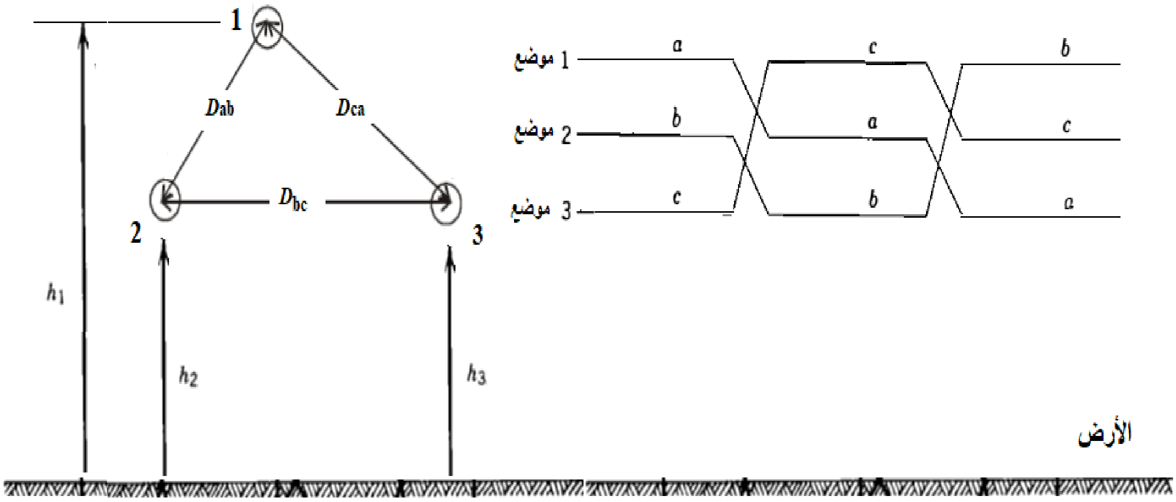
ومقلوب المصفوفة (4.17) يعطينا معادلات مشابهة الى تلك المعطاة في (4.12) مع قيم المتسعات لمجموعة ما بين موصلات الأطوار ومجموعة ما بين الأطوار نفسها والأرض. وكل من هاتين المجموعتين تكون بصورة عامة غير متوازنة بسبب عدم تساوي التباعد بين الموصلات. والمتسعات التي تكون بين أزواج من الموصلات يمكن تمثيلها بتحويل مثلثي إلى نجمي (Delta-star) كثلاث سعات إلى محايد. وعندما يكون المحايد مؤرض أو يكون عند جهد الأرض فهذه المتسعات يمكن أن تضاف إلى تلك الموجودة بين كل موصل والأرض. ومن هنا فصاعداً سنأخذ المتسعات إلى المحايد فقط في حساباتنا وسنعتبرها على أنها متوازنة، أي أنها متساوية لكل الأطوار الثلاثة. هذا سيكون تقريبياً إذا كانت الخطوط قصيرة جداً ولا تحتاج لتبديل مواضع الموصلات وسيكون حقيقياً إذا كانت الموصلات مبدلة الموضع.

7-4 إيجاد المتسعة إلى المحايد للتتابع الموجب أو السالب لخط ثلاثي الطور ذي دائرة مفردة ذات موصلات مُبدَلة الموضع

Positive- or Negative-sequence Capacitance to Neutral of a Transposed Single-circuit 3-phase Line

عند حساب متسعة التتابع الموجب (أو السالب) فالخط بصورة اعتيادية يفترض أن يكون مبدل الموضع وكذلك يمكن إهمال تأثير أي سلك أرضي هوائي سائر في أعلى الخط (فمثلا وجود سلك أرضي لخط ذي دائرة واحدة ذي فولتية 132 كيلو فولت نموذجي يقلل من قيمة المتسعة إلى المحايد بحوالي1% فقط).

إذا كان الخط مبدل الموضع كما موضح في الشكل 4-8، فحينئذ وللثلث الأول من طول الخط ستشغل موصلات الأطوار c , b, a المواضع 1 و 2 و 3 كما مبين وهكذا بالنسبة للموضعين الآخرين من الدورة .



الشكل 4-8 خط ثلاثي الطور بموصلات مبدلة الموضع.

وتبسيطاً للحل، يجب أن يلاحظ أنه قد افترضنا هنا أن الشحنة على الموصل a لكل وحدة طول هي Q_a تكون نفسها لكل موضع من مواضع التبديل الثلاثة . وإذا أردنا أن نكون دقيقين فهذا ليس حقيقياً لأنه إذا كان هبوط الفولتية بسبب ممانعة التوالي للخط صغيراً إلى حد يمكن اهماله فإن فولتية الطور إلى المحايد V_a ستكون نفسها لكل المواضع الثلاثة. وبما أن المتسعة إلى المحايد لكل موصل طور تختلف بالنسبة لهذه المواضع فعندئذ يجب أن تختلف كذلك الشحنة لكل وحدة طول. مع ذلك سيكون أسهل بكثير لو أخذنا Q_a على أنها ثابتة و V_a عل أنها متغيرة ومن ثم نجد معدل قيمة V_a للمواضع الثلاثة. والفرق بين المتسعات المحسوبة في هذه الحالة وتلك المحسوبة باعتبار V_a ثابتة يكون صغيراً جداً بحيث يتم إهماله.

للموضع الأول، تعطي المعادلات من (4.14) إلى (4.16) جهد الموصل a نسبة إلى المحايد وكما يأتي:

$$\begin{cases} V_a^{`} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}[Q_a ln\frac{2h_r}{r} + Q_b ln\frac{d_{12^`}}{d_{12}} + Q_c ln\frac{d_{13^`}}{d_{13}} \\ V_a^{``} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}[Q_a ln\frac{2h_2}{r} + Q_b ln\frac{d_{23^`}}{d_{23}} + Q_c ln\frac{d_{12^`}}{d_{12}} \\ V_a^{```} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}[Q_a ln\frac{2h_3}{r} + Q_b ln\frac{d_{13^`}}{d_{13}} + Q_c ln\frac{d_{23^`}}{d_{23}} \end{cases} \quad (4.18)$$

وللموضعين الاخرين (نستعمل حقيقة كون $d_{12} = d_{21`}$ ..الخ) . وقيمة المعدل تكون

$$V_a = \frac{1}{3}(V_a^{`} + V_a^{``} + V_a^{```})$$

بالنسبة لفولتيات التتابع الموجب أو السالب المسلطة على الخط تكون: $Q_a + Q_b + Q_c = 0$

لذلك تكون

$$V_a = \frac{Q_a}{32\pi\epsilon_o}\left[ln\frac{8h_1h_2h_3}{r^3} - ln\frac{D_{12`}D_{13`}D_{23`}}{D_{12}D_{13}D_{23}}\right]$$

$$= \frac{Q_a}{2\pi\epsilon_o} ln[\frac{\sqrt[3]{(D_{12}D_{13}D_{23}}}{r} \cdot \frac{2\sqrt[3]{(h_1h_2h_3)}}{\sqrt[3]{(D_{12`}D_{13`}D_{23`})}}]$$

والمتسعة إلى المحايد لكل موصل طور والتي يفترض أن تكون متوازنة بالنسبة للخط القصير، أو يمكن أن نعتبرها متساوية إذا كان الخط مبدل الموضع، ستكون كما معطاة بالعادلة:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_o}{ln[\frac{D_m}{r} \cdot \frac{2\sqrt[3]{(h_1h_2h_3)}}{\sqrt[3]{(D_{12`}D_{13`}D_{23`})}}]} F/m \qquad (4.19)$$

حيث أن D_m هومتوسط المباعدة الهندسي بين الموصلات ومعطى بالمعادلة:

$$D_m = \sqrt[3]{(D_{12}D_{13}D_{23})}$$

وكلما ازداد ارتفاع الخط عن الأرض مقارنة مع المسافة بين الموصلات، كلما تقترب القيمة

$$\frac{2\sqrt[3]{(h_1h_2h_3)}}{\sqrt[3]{(D_{12`}D_{13`}D_{23`})}}$$

من قيمة الواحد. وإذا أهملنا تأثير الأرض عندئذ تكون المتسعة إلى المحايد

$$C = \frac{2\pi\epsilon_o}{ln(D_m/r)} \quad F/m \qquad (4.20)$$

وبما أ ن المقدار اللوغاريتمي lnD_m/r تكون قيمته عادة بين 2 و 3 ، عليه فكيلو متر واحد من خط معلق تكون المتسعة إلى المحايد له بحدود $0.01\mu F$. بالنسبة لخط نموذجي 132 كيلو فولت ثلاثي الطور ذي دائرة واحدة، فالمتسعة المعطاة في المعادلة (4.19) تزيد عن تلك المعطاة بالمعادلة (4.20) بحوالي 1 % فقط ، لذلك بالنسبة لفولتيات التتابع الموجب والتتابع السالب يكفي استعمال المعادلة (4.20) بصورة عامة. بناء عليه فإن تأثير السلك الأرضي أو الأرضي نفسه غالباً ما يهمل.

يمكن أن تحسب متسعة التتابع الموجب المعطاة في (4.20) لخط ثلاثي الطور ذي دائرة واحدة بدون تأثير الأرض أو السلك الأرضي بطريقة مباشرة عوضاً عن ما ذكر في أعلاه. فبدلاً من استعمال المعادلتين (4.6) و (4.7) اللتين تعطيان جهد الخط نسبة إلى الأرض المتسبب عن زوج من الشحنات التي تكون صورها على الأرض عبارة عن شحنات مساوية ومعاكسة بالإشارة لتلك الشحنات الاصلية الموجودة على موصلات الخط الثلاثة. وهذه يمكن أن نتصورها موضوعة على موصل وهمي يكون بعيداً جداً عن الموصلات الحقيقية التي يمكن أن يقال أنها تبعد بمسافة S عن كل منها. لذلك فالمعادلة (4.18) يمكن ان تبدل بالمعادلات التالية:

$$V_a^{`} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}[Q_a ln\frac{S}{r} + Q_b ln\frac{S}{D_{12}} + Q_c ln\frac{S}{D_{13}}]$$

$$V_a^{``} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}[Q_a ln\frac{S}{r} + Q_b ln\frac{S}{D_{23}} + Q_c ln\frac{S}{D_{12}}]$$

$$V_a^{```} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}[Q_a ln\frac{S}{r} + Q_b ln\frac{S}{D_{13}} + Q_c ln\frac{S}{D_{23}}]$$

وإذا فصلنا الحدود؛ فالحد الذي يحتوي على المتغير S سيختفي لأن

$$Q_a + Q_b + Q_c = 0$$

وكذلك يكون

$$V_a = \frac{1}{3}\left(V_a^{`} + V_a^{``} + V_a^{```}\right) = \frac{Q_a}{2\pi\epsilon_o} ln\frac{\sqrt[3]{(D_{12}D_{13}D_{23})}}{r}$$

والتي تعطي نتيجة المعادلة (4.20) نفسها.

وإذا كان الخط يعمل بفولتية خط V_L وكان هبوط الفولتية على ممانعة التوالي له صغيراً جداً مقارنة بالفولتية V_L نفسها، عندئذ يمكن اعتبار أن الفولتية بين زوج من الخطوط عند كل نقطة على طول المسار هي نفسهاV_L. لذلك سيكون تيار الشحن الجاري في كل من موصلات الخط الثلاثة عند طرف الأرسال من الخط هو

$$I_c = j\omega Cl \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad \text{أمبير}$$

حيث أن C معطاة بالمعادلة (4.20) وl هو طول مسار الخط بالأمتار.

8-4 ظاهرة الهالة Corona

في خطوط نقل الطاقة الكهربائية ذات الفولتية العالية، إذا قمنا بزيادة الفولتية المتناوبة على موصل خط بالتدريج، فسوف تصل الفولتية إلى قيمة تعرف بالفولتية الحرجة المرئية V_v التي عندها يظهر توهج بنفسجي خافت يعرف بالهالة Corona، ويكون مصحوب بصوت أزيز خفيف ورائحة انبعاث غاز الأوزون (Ozone). وعند فولتية مقدارها V التي هي أقل بقليل من الفولتية V_v يبدأ حصول ضياع إضافي أو خسارة في القدرة ضمن نظام القدرة نفسه. هذه الخسارة P تعطى بصورة تقريبية بالمعادلة

$$P = K(V - V_o)^2 \qquad (4.21)$$

حيث K هو ثابت التناسب و V_o هي فولتية التمزيق الحرجة التي تكون ثابتة أيضاً بالنسبة لموصل معين ضمن ترتيب معين وتردد محدد وشكل موجة فولتية تجهيز محددة. هذه الخسارة من الممكن أن تزداد بصورة ملموسة بوجود الضباب والمطر. أما V_1 التي هي فولتية التشغيل وV_v و V_o فجميعها فولتيات تقاس بقيمة ج. م. ت. وبالنسبة لخط ثلاثي الطور فكلها تكون فولتية خط إلى المحايد، أي فولتية الطور. وتجدر الإشارة هنا إلى أنه لا يكفي دائماً حصر الخسارة أوالضياع في القدرة نتيجة المجالات الكهربائية الناجمة عن ظاهرة الهالة فقط ، لأن التداخل الراديوي يمكن أن يصل إلى حد كبير غير مسموح به ، في حين أن الضياع في القدرة نتيجة الهالة تكون قليلة نسبياً.

تعرف الهالة بأنها تفريغ جزئي، أي إخفاق غير تام للهواء. وإذا زادت الفولتية أكثر من الفولتية المرئية V_v فعندئذ يحدث انهيار شرري لكل المجال الهوائي. وتحدث الهالة عندما يكون المجال الكهربائي الموضعي قرب سطح الموصل عالياً لدرجة كافية ليعطي طاقة كافية للإلكترونات الحرة، الناشئة مثلاً من اشعاعات كونية، لكي تؤين جزيئات الغازات الموجودة ضمن الهواء عند التصادم معها . وبذلك سيتم

تحرير إلكترونات وأيونات موجبة أكثر التي بدورها تكتسب سرع عالية وتتعجل ضمن المجال الكهربائي المحيط مسببة تصادمات أيونية كثيرة.

الآن اذا استعملنا المجال الكهربائي عند سطح الموصل E_r بدلاً من فرق الجهد V فعندئذ تكون قيم E_r والتي تعطي النقاط الحرجة الممزقة (E_o) والمرئية (E_v) ، غير معتمدة على المباعدة بين موصلات الخط نفسها. وبالنسبة للموصلات ناعمة الملمس ذات القطر الكبير نسبياً والموضوعة في الهواء عند درجة حرارة اعتيادية وضغط اعتيادي، فان ضياع القدرة فيها نتيجة الهالة يحدث عند وصول قيمة الفولتية إلى جهد التمزيق الحرج، أي عندما تكون ذروته $E_r = E_o \simeq 30kV$ لكل سنتيمتر.

ولفولتية مسلطة ذات تردد 50هيرتز على موصل ذي نصف قطر r سم ، فإن الهالة تصبح مرئية عندما يصل تصاعد فولتية الذروة إلى:

$$E_r = E_o\left(1 + 0.3r^{-\frac{1}{2}}\right) \tag{4.22}$$

ويمكن إيجاد هذه الفولتية الحرجة المرئية بتعويض قيمة معينة للفولتية E_v المعطاة بالمعادلة (4.22) بدلاً من القيمة العامة E_r .

وتجدر الإشارة إلى أنه عند استخدام موصلات مجدولة (مضفورة) في الخط فإن ذلك يسبب ظهور الهالة عند مجال كهربائي لفولتية أقل من تلك المعطاة بالمعادلة (4.22). أي أنه تظهر الهالة بفولتية أقل بنسبة تتراوح بين 25 إلى 30%. وتزداد الفولتية E_o نسبة إلى كثافة الهواء δ_o إذا أخذت δ على أن قيمتها 1 عند درجة حرارة 20 مئوية و ضغط 76 سنتمتر زئبق. عندئذ بالنسبة لضغط جوي مقداره b سنتمتر زئبق وحرارة θ^o درجة مئوية تكون

$$\delta = \frac{3.86b}{(273 + \theta°)} \tag{4.23}$$

من المعادلة (4.1) يكون الجهد عند السطح لأحد الموصلين لخط أحادي الطور كل منهما نصف قطر r هو

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o r}$$

إذا كانت المباعدة بين الموصلات d كبيرة بدرجة كافية بحيث أن الشحنة على الموصل الآخر من الممكن إهمال تأثيرها،عندئذ يكون

$$V = \frac{Q}{\pi \epsilon_o} ln \frac{d}{r}$$

وبذلك ينتج

$$V = 2rE_r ln\left(\frac{d}{r}\right) \tag{4.24}$$

وإذا أخذنا بنظر الاعتبار تأثير الضغط ودرجة الحرارة وفيما إذا كان الموصل مجدولاً. وإذا استعملنا القيمة الأسمية لـ E_o على أنها تساوي 30 كيلو فولت (ذروة) / سم عند ضغط جوي ودرجة حرارة اعتياديين، فالمعادلة (4.22) تصبح:

$$E_v = \frac{30}{\sqrt{2}} \delta M \left(1 + \frac{0.30}{\sqrt{(\delta r)}}\right) \quad kV(r.m.s)/cm \tag{4.25}$$

في المعادلة (4.24) عندما يصل الجهد على الموصل إلى قيمة الجهد الحرج للهالة المرئية فان فرق الجهد بين الموصلين يصل إلى القيمة الحرجة V_v

$$V_v = \frac{60}{\sqrt{2}} r\delta M \left(1 + \frac{0.30}{\sqrt{(\delta r)}}\right) ln \frac{d}{r} \quad kV(r.m.s) \tag{4.26}$$

وفي حالة خط ثلاثي الطور له فولتية طور (خط إلى محايد) V (ج.م.ت) ، عندئذ من المعادلة (4.20) تكون قيمة هذه الفولتية :

$$V = \frac{Q}{2\pi \epsilon_o} ln \frac{D_m}{r}$$

$$= rE_r ln \frac{D_m}{r}$$

وبذلك يمكن إعطاء القيمة الحرجة V_v لفولتية الطور التي عندها تنشأ الهالة، بالمعادلة :

$$V_v = \frac{30}{\sqrt{2}} r\delta M \left(1 \frac{0.30}{\sqrt{(\delta r)}}\right) ln \frac{D_m}{r}\ kV(r.m.s) \qquad (4.27)$$

يمكننا أن نرى من المثال التالي أنه للقيم الاعتيادية لـ D_m/r التي نجدها عادة في الخطوط الثلاثية الطور، يمكن أن يعطى الجهد الأعظم بصورة تقريبية جداً بالمعادلة

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o r}$$

كما أنها تنطبق على الخط الأحادي الطور أيضا.

مثال محلول 4-1:

إذا كانت بداية نشوء الهالة في الهواء تحدث عندما يصل الجهد الكهربائي عند أية نقطة إلى 30 كيلوفولت / سم فأحسب مقدار أقصى فولتية يمكن أن يعمل عندها خطاً علوياً معلقاً ثلاثي الطور بدون حدوث ظاهرة الهالة إذا كانت موصلات الخط ذات قطر 1.5 سنتمتر و المباعدة بين خطوط الأطوار متساوية ومقدارها 2.5 متر.

الحل:

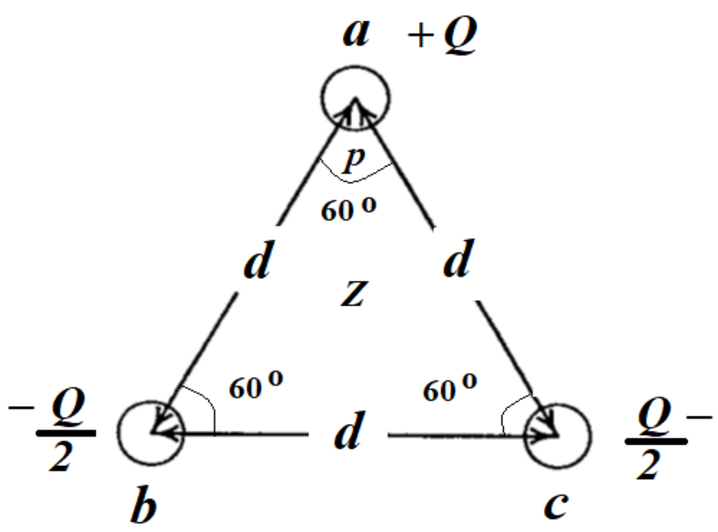
من المعادلة (4.1) يمكننا أن نستنتج أن أقصى جهد يحدث عند سطح الموصل هو في اللحظة التي تكون فيها أقصى قيمة للشحنة عليه، أي عندما تكون فولتية الطور نسبة إلى الأرض في أقصى قيمتها V_m. حيث أن $V_m = \sqrt{2}V$ و V هي ج. م. ت فولتية الطور التي قيمتها:

$$V = (1/\sqrt{3})V_L$$

حيث أن V_L هي ج.م.ت فولتية الخط.

إذا كانت الشحنة على الموصل a هي $\hat{Q}$ كولومب / متر في اللحظة التي يكون فيها فرق الجهد بين a والمحايد هو V_m ، ففي تلك اللحظة، بما أن فولتية الموصلان b و c إلى المحايد كلاهما تكون $-V_m/2$ ، فستكون كل من شحنتيهما لكل وحدة طول مساوية إلى $-\hat{Q}/2$ ، (أنظرالشكل4-9).

إن الشحنة $\hat{Q}$ الموجودة على الموصل a سوف تسبب جهداً كهربائيا في p وهي النقطة التي تقع على الخط الذي يربط مركزها إلى مركز المثلث المتساوي الاضلاع z وهذا الجهد يكون على طول الخط zp ومقداره يحسب من المعادلة (4.1)



الشكل 4-9 .

$$\frac{\hat{Q}}{2\pi\epsilon_o r} V/m$$

أما الجهود الكهربائية الناتجة عن الشحنات $-\hat{Q}/2$ على الخطين b و c فسوف يلغي احدهما الآخر بالاتجاه العمودي zp . لكن على طول الخط zp ستعطى كلها سوية جهدا مقداره

$$\frac{\hat{Q}}{2\pi\epsilon_o d}\sin 60° = \frac{\sqrt{3}}{2}\hat{Q}\frac{1}{2\pi\epsilon_o d}$$

وبذلك يكون الجهد الكلى عند النقطة p الموجه على طول الخط zp والذي يمثل القيمة القصوى له

$$\frac{\hat{Q}}{2\pi\epsilon_o}\left(\frac{1}{r}+\frac{\sqrt{3}}{2d}\right) \qquad (4.28)$$

وقيمة المتسعة إلى المحايد تكون $$C = \frac{2\pi\epsilon_o}{ln(d/r)}$$

بما أن $D_m = d$ هنا، لذ لك

$$\hat{Q} = \frac{2\pi\epsilon_o V_m}{ln(d/r)} \qquad (4.29)$$

وبتعويض قيمة $\hat{Q}$ من (4.29) في (4.28) نحصل على الجهد الأقصى:

$$\text{الجهد الأقصى} = \frac{V_m}{ln(d/r)}\left(\frac{1}{r} + \frac{\sqrt{3}}{2d}\right)$$

$$3 \times 10^6 = \frac{V_m}{ln(250/0.75)}\left(\frac{100}{0.75} + \frac{\sqrt{3}}{5}\right)$$

وبذلك يمكن ايجاد قيمة V_m

$$V_m \simeq 3 \times 10^4 \times 0.75 ln\frac{250}{0.75} = 131\,000\ volts$$

وفولتية الخط (ج. م .ت) القصوى التي يجب أن تستعمل تكون بناء على ذلك

$$\frac{131\sqrt{3}}{\sqrt{2}} = 160.5\ \ kV$$

الفصل الخامس

مكونات خطوط النقل العلوية المعلقة- العوازل والموصلات

OVERHEAD LINES – INSULATORS AND CONDUCTORS

1-5 مقدمة

يتكون خط النقل العلوي المعلق (الهوائي) من أربعة عناصر رئيسية هي الموصلات والعوازل والأبراج والملحقات الأخرى. ويعد الموصل هو الجزء الأهم والمكون الرئيس في نقل الطاقة الكهربائية. أما باقي مكونات خط النقل فهي إما لتثبيت وحمل الموصل أو لعزل الموصلات بعضها عن بعض وعن الأرض. وتسمى الخطوط العلوية المعلقة في بعض المراجع بالخطوط الهوائية لكون أن الهواء هو الوسط العازل بين الموصلات نفسها. وقد تكلمنا بشيء من الاختصار عن موصلات الخطوط وأنواعها في الفصل الثاني. أما في هذا الفصل فسوف نتطرق إلى العوازل المستخدمة في خطوط النقل وكذلك الأبراج الحاملة لهذه الموصلات.

2-5 عوازل الخطوط العلوية المعلقة Insulators for Overhead Lines

وظيفة العوازل في خطوط النقل عموماً هي عزل الموصلات الحية عن أجسام الأبراج المؤرضة وكذلك تحمل الإجهادات والقوى الميكانيكية الناجمة عن أوزان الموصلات نفسها والظروف الجوية القاسية مثل تراكم الثلوج والرياح الشديدة والعوامل المناخية الأخرى. وفي خطوط النقل العلوية تكون الأسلاك أو الموصلات المستخدمة عارية أي لا يوجد عليها عازل من أي نوع، لذلك فإننا نحتاج إلى تركيب عوازل على ذراع مستعرض ملائم لكي تعطينا حيز الخلوص الضروري بين الموصلات ذاتها وبين الموصلات والأرض تجاه أعلى فولتية وتجاه أسوأً الظروف الجوية التي من الممكن ان يتعرض لها خط النقل. كما أنه على العازل توفير الإسناد الميكانيكي الضروري للموصل تجاه أقسى ظروف التحميل الميكانيكية المحتملة.

هناك مادتان شائعتان تستعملان عادة لعزل موصلات الخطوط العلوية المعلقة المكشوفة وهما الخزف والزجاج المقسى. وهاتان المادتان ليستا العازل المثالي المطلوب. فمثلا كل منهما يتعرض للتلف

بسهولة نتيجة سوء التعامل ونتيجة رميها بالحجارة في بعض الأحيان. ويصنع الخزف من خليط متجانس صافٍ من طين لدن يصنع بالشكل المطلوب ويغطى بمسحة زجاجية ومن ثم يحرق في فرن حراري. هذه العملية تنتج خزفاً قاسياً جداً وناعماً جداً وذو سطح صافٍ أسمر. ويوصف الزجاج بانه مقسى عندما يكون سطحه في حالة إنضغاط وداخله في حالة شد. هذه الحالة يمكن أن نحصل عليها بتبريد العازل الزجاجي تبريدا فجائيا سريعا بعد تصنيعه بالشكل المطلوب ويترك الداخل ليبرد ببطء. والزجاج المقسى الناتج بهذه الطريقة يمكنه أن يقاوم قوى شد ميكانيكية أكبر من الزجاج الملدن.

تصنيف العوازل يمكن أن يتم وفقاً لقيمة فولتية الخط المقننة للنظام التي ستستعمل فيها هذه العوازل. إلا أن فولتية تشغيل العازل فهي عبارة عن فولتية الخط المقننة مقسومة على $\sqrt{3}$. كذلك فإن العوازل تتعرض أثناء العمل إلى إجهادات فجائية للفولتيات المفرطة يطلق عليها تمورات (Surges) وهي الاندفاعات القوية الفجائية للفولتيات أو التيارات الناجمة عن ضربات الصواعق وعمليات الغلق والفتح Switching . ويتم نظريا تشبيه هذه التمورات بفولتيات دفعية Impulse Voltages يمكن الحصول عليها من مولدات دفعية تنتج فولتية أحادية الاتجاه تزداد بسرعة بصورة منتظمة إلى أعلى قيمة لها خلال 1 مايكرو ثانية (وهو زمن قياسي نموذجي) وتهبط بصورة أسية إلى نصف فولتية الذروة خلال 50 مايكرو ثانيةّ. وتوصف الفولتيات الدفعية بقيمة فولتية الذروة لها والتي يمكن أن تكون موجبة أو سالبة حيث تسمى مثلا بموجة الـ 1/50 مايكروثانية بالنسبة للمثال المذكور في أعلاه .

1-2-5 أنواع العوازل المستخدمة في خطوط النقل الهوائية

يمكن تصنيف العوازل بصورة عامة كما يأتي:

- العازل ذو المسمار Pin type insulator
- العازل الدعامة Post insulator
- العازل القرصي Disc insulator (يدعى كذلك بالسلسلي String insulator أو المعلق Suspension insulator أو الشد Strain insulator).
- العوازل الشكالية Shackle Insulators
- عوازل البوليمير Polymer Insulators

(أ) العازل ذو المسمار يكون صغيراً وبسيطاً في التركيب ورخيصاً ويستعمل للفولتيات المتوسطة ولغاية 33 كيلو فولت. يصنع هذا النوع من العوازل عادة من الخزف لأن الزجاج المقسى يكون أغلى

سعراً. يربط الموصل إلى شق من قمة العازل الذي يكون ملصق على مسمار فولاذي مغلفن مربوط إلى الذراع المستعرض للعمود، أنظر الشكل 5-1.



الشكل 5-1 العازل ذو المسمار البسيط.

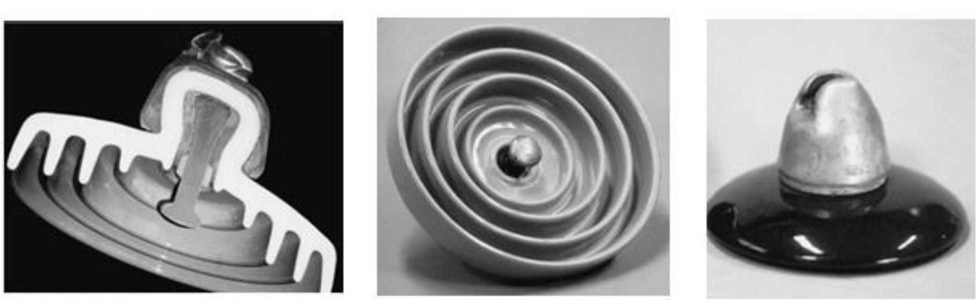
(ب) النوع الثاني من العوازل هو العازل الدعامة، الشكل 5-2. وهو عازل يستخدم للفولتيات العالية والعالية جداً التي قد تصل الى 1100 كيلو فولت. هذا العازل مشابه للعازل ذي المسمار إذ يصنع من الخزف (السيراميك) أو من قطعة واحدة من مادة مركبة (المطاط السليكوني). ويمتاز هذا



الشكل 5-2 العازل الدعامة.

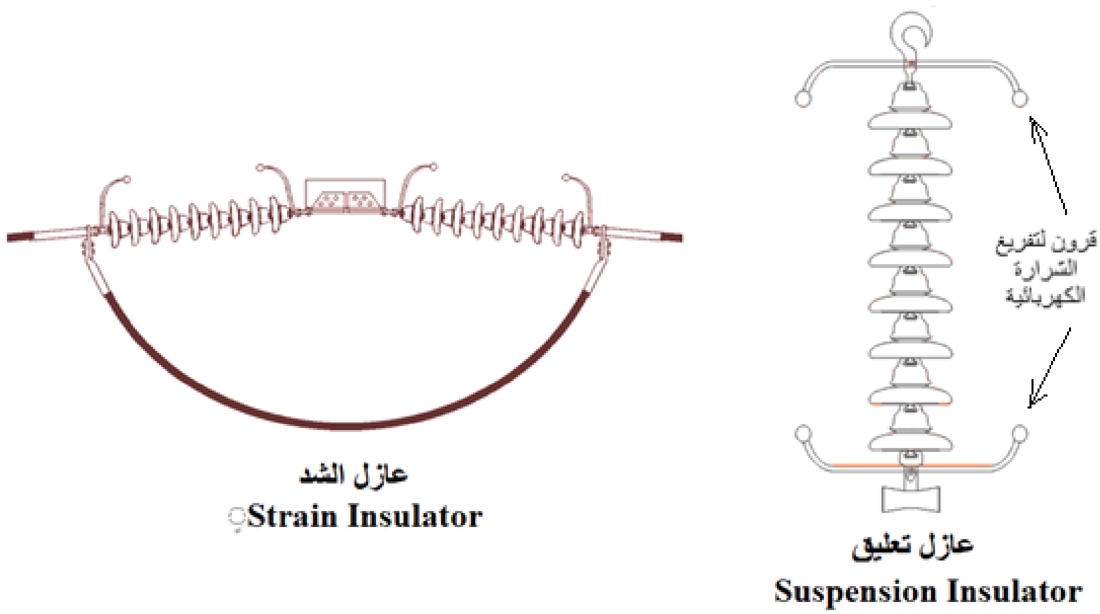
العازل بامتلاكه متانة حرارية وكيميائية جيدتين، ووزنه خفيف مقارنة بالأنواع الأخرى من العوازل. إضافة لذلك فإن له قاعدة معدنية وغالباً ما يكون له غطاء معدني لكي يكون من الممكن تركيب وحدة أخرى معه على التوالي كما في الشكل 5-2. كذلك يمكن جعل مسافة التدريج كبيرة باستعمال ظلل متشابهة مع بعضها خصوصاً للعوازل التي تستعمل في الأماكن الخارجية. والعازل الدعامة يمتاز بكونه له سعة منخفضة وله فولتية تدريج منخفضه عند الموصل المكهرب بحيث ان فولتية الهالة تكون عالية. وتكون عوازل الدعامة ذات القطر الصغير (حوالي 15 سم أو أقل) صلدة، لكن الأقطار الأكبر غالباً ما تكون مجوفة ومملوءة بوسط عازل، عادة ما يكون زيتاً لا يتأثر بالرطوبة. وتدعى عوازل الدعامة التي تستخدم لتثبيت موصلات الخطوط العلوية المعلقة بعوازل دعامة الخط، وغالبا ما تجهز عوازل الدعامة هذه بقرون حديد لتفريغ الشرارة الكهربائية حيث يمكن استخدامها للفولتيات العالية جداً في هذه الحالة.

(جـ) النوع الثالث من العوازل هو العازل القرص الذي أتت تسميته لكونه يشبه القرص تماماً. ويتكون من قرص من الخزف أو الزجاج المقسى الذي له عدة حواشٍ في الأسفل. ويزداد عدد تدريج الحواشي ومسافاتها لوحدة العازل هذه عند استخدامها في المناطق شديدة التلوث والمعرضة لتكون الضباب. ويكون كل عازل ملتصق بغطاء معدني من الأعلى ومسمار معدني (أوكره) من الأسفل، أنظر الشكل 5-3، بحيث أنه يمكن ربط عدة وحدات مع بعضها البعض بواسطة مفاصل كروية حلقية لتكون سلسلة العازل المتكاملة. هذه السلسلة تكون قابلة للثني وتعلق بصورة شاقوليه، وتسمى في هذه الحالة وحدة عازل سلسلي String insulator unit وإذا استخدم لتعليق الموصلات على الأبراج سمي بعازل تعليق Suspension insulator أنظر الشكل 5-4 (أ).



الشكل 5-3 نماذج من العوازل القرصية.

ويتم اختيار عدد وحدات العازل في السلسلة لتناسب فولتية النظام (عادة ما تكون 66 كيلو فولت فأعلى). وبما أن هذه السلسلة قابلة للثني، فيجب ضمان وجود حيز خلوص كافٍ فيما بين الموصلات المكهربة وبين المعادن المؤرضة عندما تهتز السلسلة عرضياً وتقترب إلى الخط عند هبوب الرياح القوية. كذلك تستعمل وحدات السلسلة هذه لربط طرفي الخط في برج زاوي عندما يكون هناك تغيير ملحوظ في اتجاه مسار الخط. مثل هذه العوازل تدعى سلاسل الشد Strain insulators، أنظر الشكل 5-4 (ب)، وتكون محاورها أفقية تقريباً.



(أ) (ب)

الشكل 5-4 وحدات عوازل سلسلية لتعليق موصلات الخطوط وتغيير مسارها.

وقد يستخدم عازل مفرد واحد للشد Strain insulator بدل من سلسلة عوازل كما موضح في الشكل 5-5، وهو نوع من العوازل يصمم ليتحمل العمل تحت اجهادات ميكانيكية عالية وقوى مط عالية وهو يشبه عمله عازل التعليق إلى حد كبير.

الشكل 5-5عازل شد مستقل متكامل.



(د) النوع الرابع هو ما يعرف بالعوازل الشكالية حيث تستخدم العوازل الشكالية shackle الصغيرة لتثبيت خطوط الفولتية المنخفضة 240/415 فولت المستخدمة لتجهيز القدرة للدور السكنية بصورة عامة والمحلات الصغيرة كما في الشكل 5-6.



الشكل 5-6 العوازل الشكالية للفولتيات المنخفضة.

(هـ) النوع الخامس هو عوازل البوليمير Polymer Insulators

إن العوازل الخزفية تكون في العموم ثقيلة الوزن ويصعب التعامل معها أثناء النصب والتركيب والصيانة. لذا فقد تم التوجه في السنين الأخيرة لاستعمال العوازل المصنعة من البوليمير وخاصة الألياف الزجاجية (الفايبر جلاس Fiberglass) نظراً لخفة وزنها وكونها عازل جيد للكهرباء والحرارة وامتلاكها خواص كهربائية وميكانيكية وكيميائية وحرارية فريدة تجعلها تعد عازلاً جيداً.

بعد هذا العرض السريع والمختصر لأنواع العوازل تجدر الإشارة هنا إلى أنه عندما تتضرر وحدة عازل من الزجاج المقسى فأنها ستتقطع ذاتيا إلى قطع صغيرة، وبذ لك يكون من السهولة اكتشافها، لكن من الضروري أن يبقى الرابط الإسمنتي بين المسمار والغطاء ماسكاً في مكانه وإلا فإن الخط سيتدلى للأسفل مما يجعل ارتفاع حيز الخلوص عن الأرض أقل من الحد القانوني المسموح به.

ولكي نتفهم تكنلوجيا تصنيع العوازل والحسابات الخاصة بها فان ما سنناقشه من الأمور التي سترد تنطبق على جميع أنواع العوازل مع أن العازل ذا المسمار سوف يعطى كمثال محدد هنا. فإذا كان العازل نظيفاً وجافاً فمن الممكن أن يصيبه العطل في ظرف جوي جاف لأسباب متعددة نذكر منها على سبيل المثال لا الحصر:

1- من الممكن ان يصيب العازل خرق في بنيته بسبب فولتية عالية. وفولتية الخرق لأي عازل هي الفولتية التي تخترق الخزف بين الموصل ومسمار التثبيت مسبّبة تدمير العازل نفسه. وتقاس فولتية الخرق مختبرياً وذلك بتسليط فولتية 50 هيرتز مفرطة على العازل بعد أن يغمر في زيت عازل. وتنص المواصفات القياسية الدولية والبريطانية في هذا الخصوص على أن العازل ذو المسمار المصمم ليتحمل فولتية تشغيل 11 كيلوفولت يجب أن يتحمل 95 كيلوفولت جـ . م .ت (أي حوالي 15 مرة بقدر فولتية التشغيل) من دون أن يصيبه خرق ، لهذا السبب يستعمل التعبير (فولتية الصمود) للدلالة على فولتية الصمود للعازل قبل انهياره . ويجب أن تصمم العوازل بحيث أنه من المستحيل أن يصيبها الخرق.

2- من الممكن أن يصيب العوازل شرر عرضي Flashover. وفولتية الشرر العرضي هي الفولتية التي تسبب شرارة خلال الهواء المحيط بالعازل. وتعرف المسافة التي يحدث الشرر العرضي في الجو الجاف خلالها كونها أقل مسافة مقاسة بشريط قياس متري متوتر من المسمار الحامل للعازل إلى الموصل. فبالنسبة لعازل ذي مسمار 11 كيلو فولت، تكون فولتية الصمد (الذروة) الدفعية حوالي 10.6 مضروبة في ذروة فولتية التشغيل (القصوى). ويكون زمن فولتية الصمد، ذات تردد 50 هرتز، هو دقيقة واحدة في الأحوال الجافة وقيمتها (جـ. م. ت.) حوالي 7.9 مضروبة بفولتية التشغيل. والاشارة هنا إلى زمن فترته دقيقة واحدة يعني أن فولتية الفحص يجب أن ترفع بأسرع ما يمكن إلى القيمة المناسبة وتثبَت لمدة دقيقة واحدة. إن فولتيات الشرر العرضي الفعلية يجب أن تكون أكبر من قيم فولتيات الصمد. وتجدر الإشارة أيضاً إلى أنه إذا حدث شرر عرضي لعازل اثناء الاشتغال بسبب فولتية تمور (فولتية عالية جداً) فجائية فان الهواء المحيط بالعازل سيتأين بحيث تحدث شرارة كهربائية نتيجة لذلك بسبب فولتية التشغيل حتى بعد مرور التمؤر العابر. لهذا السبب غالباً ما تثبت للعوازل قرون معدنية لمنع حصول الشرارة وإبعادها عن العازل.

من الممكن أن يصبح السطح العلوي للعازل اثناء الخدمة رطباً ندياً وملوثاً بأتربة صناعية، أو برذاذ ساحلي في شواطئ البحار محمل بالملح أو بالجليد أو الضباب إلى الحد الذي تصبح سطوح العوازل هذه ذات مقاومة كهربائية منخفضة جداً لتيار التسرب السطحي الذي تسببه فولتية التشغيل. إن المقاومة المؤثرة التي يبديها سطح العازل تكون بسبب المسافة التدريجية المحمية التي تمثل مجموع المسافات المقاسة على طول الانحناءات التي تقع تحت سطوح العازل والتي تبقى يابسة في حالة توجيه تيار مباشر على العازل ومسماره الذي يكون في وضع شاقولي. وتعطي المواصفات القياسية الدولية والبريطانية المسافات المتدرجة الدنيا للعوازل التي تستعمل في ظروف جوية معتدلة، كذلك في ظروف

تلوث شديدة وقاسية. وفى حالة الظروف القاسية تعطي هذه المواصفة المسافة الكلية والمسافة المتدرجة المحمية التي يمكن اعتمادها لتصميم عازل له أكبر عدد ممكن من الظلل أو الحواشي.

إن المسافة التي يحدث خلالها الشرر العرضي في الأحوال الجوية الرطبة لعازل ما تعرف بكونها مجموع كل المسافات مقاسة من الحافة الخارجية للظلة وعمودية على سطح الظلة التي تحتها (أو إلى المسمار أو الموصل أيهما أقل). من المعتاد تعريض العوازل إلى فحص المطر الاصطناعي الموصوف في المواصفات القياسية البريطانية 137. ولعازل ذي مسمار 11 كيلوفولت تكون فولتية الصمد، للأحوال الرطبة وبتردد القدرة وبزمن دقيقة واحدة، حوالي 4.7 مرة بقدر فولتية التشغيل. وتقاس الفولتية التي يحدث عندها الشرر العرضي في الأحوال الجوية الرطبة بالأسلوب نفسه. ولكون أنه من الصعب إجراء فحوص مطرية ذات دقة مقبولة، لذلك فالتوجه هو اعتماد مسافات التدريج والشرر العرضي للأحوال الرطبة المبنية على الخبرة المأخوذة من العوازل التي هي أصلاً في الخدمة بدلاً من إجراء الفحوص المطرية.

من الواضح أن مقاومة السطح لا تعتمد فقط على مسافة التدريج، لكنها تعتمد كذلك على العرض المقاس من السطح والسمك وتكوين الطبقة الرقيقة الموصلة. ويعد تقليل تيار التسرب السطحي مشكلة رئيسية في تصميم العوازل وصيانتها. والعازل ذو التصميم الجيد هو الذي تكون له طبقة صافية صقيله صلدة وناعمة وخالٍ من التشققات والخدوش، حيث يفضل استخدامه في المناطق قليلة التلوث كونه لا يحتاج إلى صيانة كثيرة، خصوصاً إذا كان سقوط الأمطار في هذه المناطق يكون بدرجة كافية لكي تغسل وتحافظ على العازل نظيفاً.

5-2-2 توزيع الفولتية على العازل السلسلي

VOLTAGE DISTRIBUTION OVER AN INSULATOR STRING

تكمن المشكلة الرئيسية في عوازل السلسلة هي في توزيع الفولتية على السلسلة نفسها. حيث أنه لسلسلة متكونة من عدد من وحدات عوازل مماثلة لبعضها نظيفة وجافة ولا يوجد أي جسم معدني قريب منها، عندئذ ستنقسم الفولتية المسلطة بالتساوي على وحدات العازل كما في الشكل 5-7. وذلك لأن هذه الوحدات ستتصرف كمقسم فولتية متكون من متسعات وليس مقاومات. لكن في الاستعمال الفعلي يكون لكل نقطة تربط الغطاء المعدني والمسمار متسعة إلى البرج المؤرض، أنظر الشكل5-7. ومن المعتاد الفرض أن هذه المتسعات تكون متساوية جميعها وذات قيمة تساوي kC ، حيث أن C هي المتسعة لكل

وحدة في السلسلة ، أما قيمة k فتتراوح عادة بين 0.1 و 0.2 . وتكون العلاقة بين الفولتية عبر السعة والتيار المار بها كما يأتي:

$$I = 2\pi f\ (C\ \times V) \qquad (5.1 - \text{أ})$$

ولما كان التردد f ثابتاً، ولفولتية V ثابتة فان التيار يتناسب مع السعة تناسبا طردياً، أي أن

$$I \propto C \qquad (5.1 - \text{ب})$$

ولمتسعة C ثابتة القيمة، نلاحظ أن الفولتية أيضاً تتناسب طردياً مع التيار I

$$V \propto I \qquad (5.1 - \text{جـ})$$

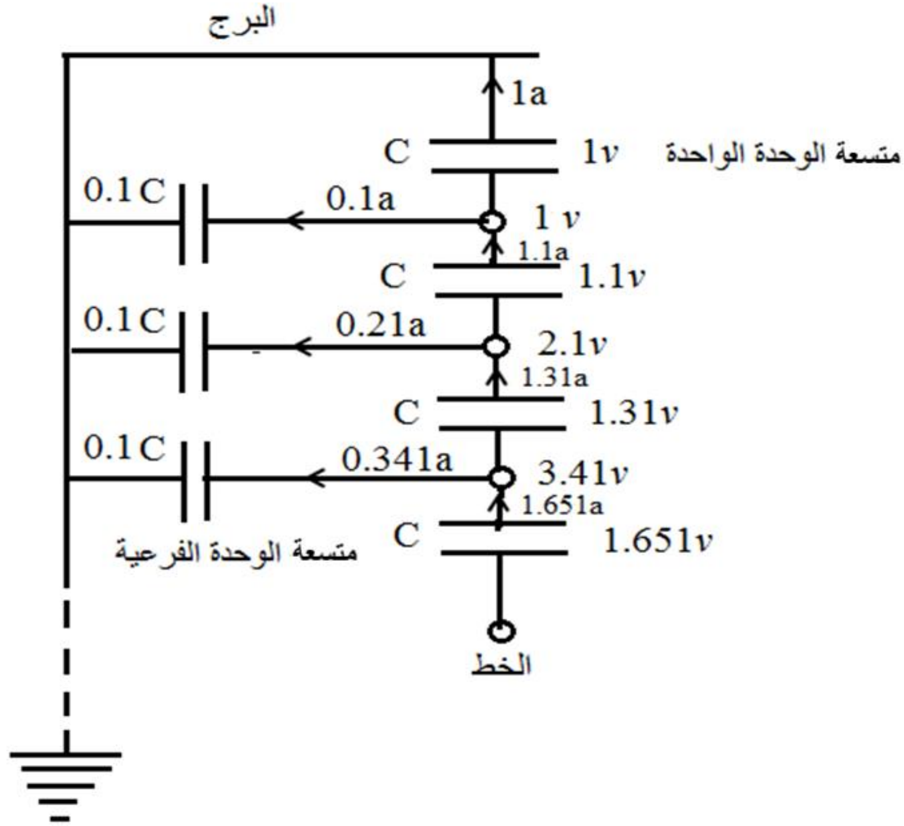
بالإمكان حساب توزيع الفولتية على العازل السلسلي وذلك بفرض أن وحدة العازل التي في طرف البرج تأخذ وحدة واحدة لا على التعيين من التيار (يرمز لها $1a$) ، ووحدة واحدة لا على التعيين من الفولتية ($1v$). فاذا أخذنا $k = 0.1$ مثلاً، عندئذ وباستعمال المعادلة (ب $- 5.1$)؛ سيكون التيار في السعة المتفرعة العليا $0.1\ a$. وهكذا يكون التيار في وحدة العازل الثانية $1.1a$. وباستعمال المعادلة (جـ $- 5.1$) ستكون الفولتية عبرها $1.1v$. لذلك من الممكن ايجاد الفولتية النسبية عبر كل وحدة من العازل وعبر السلسلة بأكملها. من الواضح أن وحدة العازل في طرف الخط تأخذ الحصة الأكبر من الفولتية الكلية. وإذا افترضنا أن الشرر العرضي على وشك أن يحدث في هذه الوحدة، عندئذ سيكون على وشك أن يحدث في السلسلة كلها.

إن كفاءة السلسلة بالنسبة المئوية تعرف كما في المعادلة التالية:

$$\frac{\text{فولتية الشرر العرضي للسلسلة}}{n \times \text{فولتية الشرر العرضي لوحدة عازل واحدة}} \times 100 \qquad (5.2)$$

حيث أن n هي عدد الوحدات في السلسلة، ففي المثال أعلاه تكون كفاءة السلسلة هي:

$$\frac{5.061 \times 100}{4 \times 1.651} = 76.8\%$$



الشكل 5-7 كفاءة السلسلة.

وتقل كفاءة السلسلة كلما ازداد عدد وحدات العازل. ويمكن تحسين كفاءة السلسلة بتقليل المتسعة الفرعية نسبة إلى المتسعة لكل وحدة. وهناك طريقة ثانية لتحسين الكفاءة وذلك بزيادة متسعة كل وحدة من طرف البرج باتجاه طرف الخط. لكن هذه نادراً ما تستعمل لأن ذلك سيشمل استعمال وحدات مختلفة لكل وحدة عازل، وهذا يتعارض مع التوجه القاضي بجعلها وحدات قياسية والاقتصار على أقل الأنواع الممكنة. كذلك يمكننا أن نحصل على زيادة في الكفاءة بإبدال قرون الشرارة في وحدات العازل التي في طرف الخط بحلقة تدريج. هذا سيؤدي إلى زيادة المتسعة المؤثرة لوحدات العازل القريبة من طرف الخط، لكن تأثيرها يتلاشى كلما ازداد عدد وحدات السلسلة.

لتحسين توزيع الفولتية على العازل السلسلي يستعمل طلاء صقيل ذي مقاومة عالية في محاولة للتغلب على مشكلة تلوث السطح حيث تغطى بعض العوازل بطبقة خفيفة من دهان السيليكون الذي يمتص الأوساخ ويحول الماء النازل على سطح العازل الى قطرات بدلاً من أن يُكوِن الماء طبقة رقيقة على سطح العازل.

3-5 مواد الموصلات للخطوط العلوية المعلقة

Conductor Material for Overhead Lines

في الخطوط العلوية المعلقة تستعمل المواد التالية للموصلات بصورة عامة:

1- نحاس مسحوب بقسوة (Hard Drawn) ذو توصيل عال .

2- نحاس - كادميوم مسحوب بقسوة .

3- ألمنيوم مسحوب بقسوة وسبيكة ألمنيوم

4- ألمنيوم ذو لب فولاذي (SCA)

البيانات القياسية ذات العلاقة بهذه المواد وبالموصلات القياسية المصنوعة من هذه المواد يمكن الاطلاع عليها فى المواصفات القياسية الدولية والبريطانية المخصصة لها.

يمكننا القول إن أهم خاصية التي يجب ان تمتلكها أية مادة يصنع منها موصل خط علوي معلق هي أن تمتلك قوة شد عالية (أي أن تحملها لقوى القطع يكون عاليا) بحيث أن البون (المسافة) بين الأبراج (أو الأعمدة) يكون أطول ما يمكن والتدلي في السلك يكون أقل ما يمكن (أنظر الفقرة5-4)، وبذلك نقلل من أعداد هذه الأبراج وارتفاعاتها وعدد العوازل المستعملة. كذلك يجب أن تكون للموصل مقاومية واطئة لكي نقلل من مفاقيد القدرة المقاومية I^2R ومن هبوط الفولتية. كما يجب أن تكون الكلفة الكلية التي تشمل كلفة النصب والصيانة قليلة. إن إحدى النقاط المهمة هنا أيضاً هي العمر التشغيلي المتوقع للموصل الذي يجب أن يؤخذ بعين الاعتبار، والاختيار النهائي لمادة الموصل غالبا ما يكون هو التوفيق بين كل الأمور التي وردت سلفا.

من الثابت أن موصلات الخطوط العلوية المعلقة يجب أن تكون مجدولة لكي تكون أكثر قابلية للثني خلال النصب وعندما تكون في الخدمة. وأغلب الموصلات المستخدمة يكون لها سلك مركزي واحد وحوله توضع طبقات من الأسلاك بحيث أن الطبقة الاولى لها 6 أسلاك، والطبقة الثانية لها 12 سلكاً والتي تليها 18 سلكاً وكل طبقة تزيد على التي قبلها بستة أسلاك (على فرض أن جميع الأسلاك لها أقطار متساوية كما هي العادة) . وتبرم كل طبقة باتجاه يعاكس الطبقة التي قبلها (تكون الطبقة الخارجية باتجاه اليمين دائماً) لكي تزيد بذلك القوة الميكانيكية الكلية للموصل.

يمكن أن تتآكل الموصلات بسبب التفاعلات الكيمياوية مع الجو الملوث، أو بسبب الأكسدة أو بسبب الفعل الكهروكيميائي بين المواد المختلفة في الألكتروليت بسبب رذاذ الملح أو حامض الكبريتيك أو بسبب ثاني اوكسيد الكبريت الموجود في الجو.

عند مضي فترة طويلة من الزمن على الموصلات التي في العمل، تميل سطوحها الى اكتساب خشونة بسبب التآكل والتلوث. وفي حالة هبوب الرياح الدوامية فان هذه الموصلات تميل الى الاهتزاز أو الارتعاش بتردد عالٍ نسبياً (10 هيرتز) وذي قيمة ذروة واطئة. كما أن الموصلات قد تدور أحياناً حول نفسها بصورة غير منتظمة وبتردد واطئ (1 هيرتز) ولكن بذروة دوران عالية، وسبب ذلك يعود مثلاً إلى تكون طبقة ثلجية تغلف الموصل نفسه في حالة سقوط الثلج بصورة مفاجئة. هذه الظاهرة يمكن ان تؤدي إلى أن الموصل يقفز إلى الأعلى بسبب مرونته. مثل هذه العوامل يجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عند حساب مسافة التباعد بين الموصلات لإن الموصلات يجب ألا تكون متقاربة بدرجة تسمح بحدوث شرر عرضي فيما بينها. إن المباعدة بين الموصلات واقطارها الكلية يؤثران على قيم المحاثة والمتسعة وعلى فولتية بداية نشوء الهالة، والاختيار النهائي لهما (المباعدة والقطر) يكون معتمدا على عدة اعتبارات تقنية واقتصادية، حيث يجب أن تبقى المباعدة بالحد الأدنى وعلى أن تكون منسجمة مع الاعتبارات المذكورة أعلاه خصوصا بالنسبة لخطوط الفولتية المنخفضة. أما بالنسبة لخطوط الفولتية العالية، فمن المستحسن استعمال موصل ذي قطر كلي كبير نوعا ما كالموصلات المحزومة مثلاً.

إن أغلب مواد موصلات الخطوط العلوية المعلقة تكون من النوع الصلد المسحوب لكون أن تيار الحمل المتكرر الذي يسري بالموصل يجعل السلك لدناً ومیالاً للنعومة . وهذا التأثير، سوية مع التأثير المناظر على عقد الشد في الموصل، سوف يؤثر على القيمة الفعلية لتيار الخط المقنن. كذلك فان قابلية الموصل على التخلص من حرارته وتبديدها تعتمد على محيط سطحه الخارجي وعلى درجة حرارة الجو المحيط والرياح والاشعاع الشمسي. لهذا السبب يكون للخطوط تيارات مقننة (مقررة) يمكن تلخيصها كما يأتي:

1- تقنين التيار في الاجواء الباردة والأجواء الاعتيادية والأجواء الحارة.

2- مقنن تيار لحمل مفرط لفترة عشرة دقائق ولفترة عشرين دقيقة.

3- مقنن لتيار عطل في زمن قصير جدا.

البيانات التالية الخاصة بمواد الموصلات، أخذت جميعها في درجة الحرارة القياسية 20 مئوية.

1-3-5 نحاس لدن ذو موصلية ـ عالية High-conductivity annealed copper

رغم ان هذه المادة المصفاة الكتروليتياً لا تستعمل للخطوط العلوية المعلقة، فان خواصها الكهربائية غالبا ما تؤخذ مرجعاً قياسياً.

المقاومية = 1.724 مايكرو أوم - سم

يقال عن هذه المادة انها ذات موصلية 100%

معامل درجة الحرارة للمقاومة عند 20 مئوية (لكتلة ثابتة) = 0.00393 لكل درجة مئوية.

الكثافة في درجة حرارة $20°$ مئوية = 8.89 غرام / سم^3 = 8890 كغم / م^3

معامل التمدد الخطي $\alpha = 17 \times 10^{-6}$ لكل درجة مئوية

(ملاحظة: في هذا الفصل اخذت α على انها علامة لمعامل التمدد الخطي وليس معامل درجة الحرارة للمقاومة لكون أن المواصفات البريطانية القياسية تستعمل الحرف اللاتيني α علامة لكليهما).

2-3-5 نحاس مسحوب بقسوة ذو موصلية عالية

Hard-drown high-conductivity copper

الأسلاك النحاسية الصلدة المسحوبة لها قوة ميكانيكية عالية ولكنها كذلك ذات مقاومية أعلى من السلك اللدن. وتمتاز هذه الأسلاك بالبيانات التالية:

الكثافة = 8.89 غم / سم^3

معامل التمدد الخطي $\alpha = 17 \times 10^{-6}$ لكل درجة مئوية

معامل يونك Young للمرونة $E = 1.24 \times 10^{11}$ نيوتن / م^2

لتيار مقنن معلوم تكون للنحاس موصلية عالية وقطر كلي صغير نسبة إلى المواد البديلة. لذلك يكون تأثير حمل الريح المستعرضة والثلج على الموصل قليلاً ولكن فولتية بدء الهالة تكون منخفضة أيضاً (أنظر الفقرة 4-8 في الفصل الرابع) لذلك لا يستحسن استخدام النحاس المسحوب بقسوة في خطوط الفولتية العالية جدا. وللنحاس المسحوب بقسوة أيضا قوة شد واطئة نسبيا وهذا يعني أنه لا يمكن

استعماله إلا عندما تكون المسافة بين الأبراج قصيرة. والميزة الجيدة للنحاس المسحوب هي أن عمره التشغيلي طويل جداً لأنه لا يتعرض لأي شكل من أشكال التآكل.

3-3-5 نحاس كادميوم مسحوب بقسوة Hard-drawn cadmium copper

لقد وجد أن إضافة ما نسبته 1 % من عنصر الكادميوم إلى النحاس يرفع قوة الشد للنحاس بصورة ملحوظة، لكن هذا يتم على حساب زيادة في قيمة الموصلية.

المقاومية (القصوى) = 2.177 مايكرو أوم - سم

الموصلية (الدنيا) =(1.724 ÷2.177)×100 = 79.2%

الكثافة = 8.945 غم/سم^3

معامل التمدد الخطي $\alpha = 17 \times 10^{-6}$ لكل درجة مئوية

معامل يونك للمرونة $E = 1.24 \times 10^{11}$ نيوتن / م^2

يستعمل الموصل المصنوع من النحاس المضاف اليه عنصر الكادميوم للأبوان (المسافة بين الأبراج) المتوسطة ولكنه، كما في النحاس المسحوب، لا يفضل استخدامه للفولتيات العالية. كما أنه يكون أغلى من النحاس المسحوب لوحده.

4-3-5 المنيوم مسحوب بقسوة Hard-drawn aluminum

المقاومية (القصوى) = 2.826 مايكرو أوم - سم

الموصلية (الدنياً) = 61.1 %

الكثافة = 2.703 غم / سم^3

معامل التمدد الخطي $\alpha = 23 \times 10^{-6}$ لكل درجة مئوية

معامل يونك للمرونة $E = 6.6 \times 10^{10}$ نيوتن / م^2

تتغير بيانات الألمنيوم اعتمادا على نقاوته وتاريخه الفيزيائي السابق. ويتم التوجه إلى استعمال الألمنيوم (بخصوصية أكثر في الكيبلات الأرضية) عندما يكون سعر النحاس عالياً. إن مقارنة الألمنيوم بالنحاس تعتمد على أسس معينة فمثلا تتم المقارنة بوزن متساوٍ أو بمقاومة متساوية أو بسعة حمل تيار متساوية ومن وجهة نظر قابلية تبديد الحرارة. على أية حال، للألمنيوم قوة شد واطئة لذلك يستعمل

للأبوان القصيرة فقط. وبما أن له مقطع عرضي أكبر من النحاس عموما فانه يتعرض لتأثير تحميل الرياح والثلج بصورة أكبر. كذلك فان من سلبيات الألمنيوم أنه يتعرض للتآكل بسبب الظروف الجوية.

5-3-5 سبيكة المنيوم مسحوبة بقسوة Hard-drawn aluminum alloy

لقد وجد بأن إضافة نسبة تقارب $\frac{1}{2}$% من كل من السيليكون والمغنيسيوم للألمنيوم ينتج سبيكة تزيد من مقاومتها للتآكل، وكذلك تزيد قوة الشد الميكانيكية لها لكن على حساب الموصلية. وسبيكة الالمنيوم هذه يمكن أن تستعمل لأبوان أطول قليلا من تلك التي يستعمل فيها النحاس المسحوب بقسوة. أما خواص سبيكة الألمنيوم هذه فتكون:

المقاومية (القصوى) = 3.25 مايكرو أوم - سم

الموصلية (الدنيا) = 53 %

الكثافة = 2.70 غم / سم³

معامل التمدد الخطى $\alpha = 23 \times 10^{6}$ لكل درجة مئوية

معامل يونك للمرونة $E = 6.8 \times 10^{10}$ نيونن / م²

6-3-5 الألمنيوم ذو اللب الفولاذي (أ.ل.ف.) Steel-Cored Aluminum (S.C.A)

يتم التوجه في الوقت الحاضر بصورة مكثفة إلى استعمال هذا النوع من الموصلات المصنوعة من الألمنيوم كموصل قياسي للفولتيات 132 كيلو فولت فأعلى. فمثلا الموصل ذي اللب الفولاذي (أ. ل. ف.) قياس 7/54/0.32 سم الذي يتكون من فتيلة فولاذية مركزية محاطة بطبقة من 6 فتائل فولاذية، ثم ثلاث طبقات من الألمنيوم ذوات 12 و 18 و24 فتيلة على التوالي، وكل منها ذات قطر 0.32 سم. والفولاذ المستخدم يعطي قوة الشد الميكانيكية الضرورية. والألمنيوم يعطي الموصلية الكهربائية أما موصلية الفولاذ فإنها تعتبر مهملة.

بيانات الفولاذ المغلفن تكون كما يلي :

الكثافة = 7.8 غم/سم³

معامل التمدد الخطى $\alpha = 11.5 \times 10^{-6}$ لكل درجة مئوية

معامل يونك للمرونة $E = 1.93 \times 10^{11}$ نيوتن / م²

الفولاذ والألمنيوم كلاهما يتأكسد بسبب الاوكسجين الموجود في الجو، والفعل الالكتروليتي (التآكل) يمكن أن يتم بين الزنك والألمنيوم في مناطق التلوث الصناعي ورذاذ الملح . لهذا السبب توضع طبقة من الشحم بين الفولاذ والألمنيوم عند تصنيع الموصل.

تستعمل موصلات الألمنيوم من نوع (أ. ل . ف) للأبوان الطويلة بسبب قوته الميكانيكية لكي يحد من التدلي ويقلل من عدد الابراج المستعملة. لكن قطره الكبير يؤدي إلى زيادة في تحميله بسبب الرياح وتراكم الثلوج، لكنه كذلك يزيد من قيمة فولتية بدء الهالة.

4-5 معامل المرونة التقديري لموصل نوع الألمنيوم ذو اللب الفولاذي (S.C.A)

VIRTUAL MODULUS OF ELASTICITY OF S.C.A

يعرف معامل يونك للمرونة E لأي مادة بانه $E = \frac{\text{الأجهاد}}{\text{المطاوعة}}$ ويتم إيجاده بتسليط قوة سحب على المادة إلى حد أن تفقد مرونتها الطبيعية، أي عندما تتناسب المطاوعة والإجهاد تناسبا طرديا. وهكذا فأن E تساوي كذلك التغير في الإجهاد / التغير المناظر في المطاوعة. وقيم E لمادتي الفولاذ والألمنيوم معروفتان. لكن المشكلة الآن هي كيفية ايجاد القيمة التقديرية E_n للموصل المركب من كلتا المادتين كما هو الحال في الموصل نوع الألمنيوم ذو اللب الفولاذي (S.C.A).

لنفترض أنه عند كل نهاية لطول معين من الموصل يتم شبك الفولاذ والألمنيوم بصورة مضبوطة بحيث أنه لا يمكن أن يحصل أي انزلاق بين المادتين. في هذه الحالة فإن أية مطاوعة سوف تكون متساوية بالنسبة للفولاذ والألمنيوم وكذلك للموصل المركب. وإذا كان الموصل خالياً من أية قوة شد في البداية ثم سلطنا عليه قوة مقدارها F فأن

$$F = f_s A_s + f_a A_a$$

حيث f = الإجهاد و A = مساحة المقطع ومعدل الإجهاد يكون

$$(f_s A_s + f_a A_a)/(A_s + A_a)$$

والمطاوعة = $f_s/E_s = f_a/E_a$ والمعامل التقديري يمكن تعريفه كما يأتي:

$$E_v = \frac{\text{معدل الاجهاد}}{\text{المطاوعة}} = \frac{(f_s A_s + f_a A_a)E_s}{(A_s + A_a)f_s} = \frac{A_s E_s + A_a E_a}{A_s + A_a} \qquad (5.3)$$

5-5 المعامل التقديري للتمدد الخطي لموصل الألمنيوم ذو اللب الفولاذي

VIRTUAL COEFFICIENT OF LINEAR EXPANSION OF S.C.A.

يعرف معامل التمدد الخطي α لمادة ما هو الزيادة في طول المادة عند ارتفاع درجة الحرارة وحدة واحدة. فإذا أخذنا الطول كونه l مثلاً فالزيادة ستكون δl عندما ترتفع درجة الحرارة بمقدار $\delta\theta$ ، عندئذ:

$$\alpha = \delta l/(l.\delta\theta)$$

لنفترض أن $\delta\theta = 1,\ l = 1$ لتسهيل الحل، عندئذ سيكون $\alpha = \delta l$. فإذا كان لدينا وحدة طول من موصل نوع موصل الألمنيوم ذو اللب الفولاذي ممتدٍ على سطح أفقي عديم الاحتكاك ومثبت عند إحدى نهايتيه وسلطت عليه قوة توتر F في النهاية الأخرى، وكانت النهايات مشبوكة، كما ذكر سابقاً، بحيث أنه عند كل نهاية لا يحدث أي انزلاق في أي من الفولاذ أو الألمنيوم بالنسبة للآخر. أفرض الآن أن درجة الحرارة قد ارتفعت درجة واحدة. عندئذ يجب أن يتمدد الفولاذ بمقدار α_s والألمنيوم بمقدار α_a . ولكن أي تغير في الطول سيحدث تغييراً في الإجهاد. أفرض أن إجهاد التوتر في الفولاذ والألمنيوم يزداد بمقدار δf_s و δf_a على التعاقب مع بقاء القوة المسلطة ثابتة لم تتغير بحيث أن:

$$\delta f_s A_s + \delta f_a A_a = 0$$

وبسبب الزيادة فى إجهاد التوتر فالزيادة المناظرة في الطول تكون $\delta f_s/E_s$ و $\delta f_a/E_a$. أما التغير الفعلي في طول الفولاذ و طول الألمنيوم وطول الموصل المركب (أ.ل.ف.) يجب أن تكون جميعها متساوية ولذلك

$$\alpha_v = \alpha_s + \delta f_s/E_s = \alpha_a + \delta f_a/E_a$$

حيث أن α_v هو التغير الظاهري في طول الموصل المركب نوع الألمنيوم ذو اللب الفولاذي **لكل** وحدة طول ولكل وحدة ارتفاع في درجة الحرارة، أي أن معامله التقديري يكون ذو تمدد خطي. وعلى القارئ ان يثبت أنه إذا حذفنا δf_s و δf_a فسنحصل على ما يأتي:

$$\alpha_v = \frac{\alpha_s A_s E_s + \alpha_a A_a E_a}{A_s E_s + A_a E_a} \qquad (5.4)$$

الفصل السادس

أبراج خطوط النقل

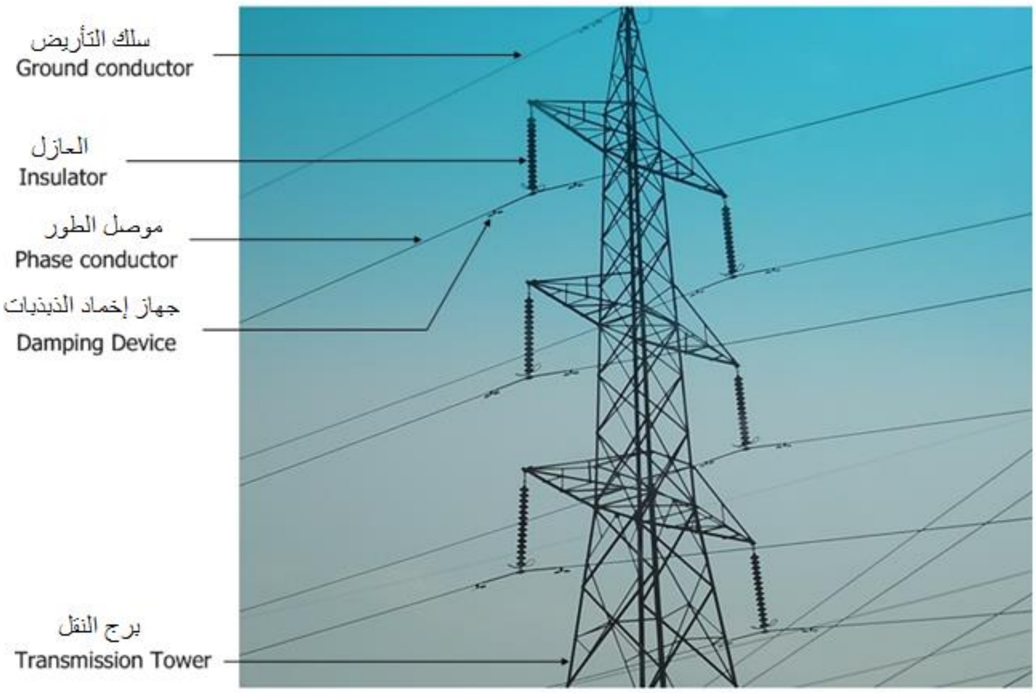
TRANSMISSION LINES TOWERS

1-6مقدمة

تعد أبراج نقل الطاقة العمود الفقري لخطوط النقل حيث تقوم الأبراج بحمل الموصلات التي تنقل القدرة الكهربائية من منطقة إلى أخرى. ولكون أن العازل بين الأسلاك هو الهواء الطبيعي فإن هذه الخطوط التي تسمى بالخطوط الهوائية أو العلوية المعلقة أو تسمى اختصاراً بـ "البايلون Pylon" تعد الطريقة الأقل كلفة من الناحية الاقتصادية لنقل كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية. وتصمم وتصنع أبراج النقل وفقاً للفولتية التي يقوم البرج بنقلها، فبالنسبة للفولتيات المتوسطة (11-33 كيلو فولت) تصنع هذه الأبراج من الأعمدة الخشبية أو الحديد أو الأسمنت المسلح وتسمى حينئذ بالأعمدة الناقلة Poles، أما للفولتيات العالية فتصنع من الحديد الصلب المجلفن (الفولاذ Steel) أو سبائك الألمنيوم والمعادن الأخرى وفي بعض الأحيان تصنع من البلاستك المسلح ويطلق عليها "الأبراج ". أما شكل هذه الأبراج إما أن تكون مشبَكة الهيكل Lattice structure أو أنبوبية Tubular type وتكون هذه الأبراج المتخصصة بنقل الفولتيات العالية على أنواع متعددة حيث يأخذ البرج تسميته عادة من نوع العازل المثبت عليه، فاذا كان العازل تعليق حينئذ يسمى برج تعليق وإذا كان العازل شد فيسمى برج شد وهكذا كما سيتم شرحه لاحقاً.

2-6 مكونات برج النقل

يتكون برج النقل من الهيكل الحديد الرئيسي الذي يختلف شكله باختلاف الفولتية العاملة وكذلك تصميم ارتفاعه وحيز الخلوص. بصورة عامة يتم تصميم الأبراج على أن تكون ذاتية الدعم بحيث تتحمل وزن الموصلات والرياح والجليد التي قد تهب من أي اتجاه، وتكون لهذه الأبراج قواعد مربعة الشكل وأربع نقاط اتصال مع الأرض .أما المواد المستخدمة فهي الحديد الصلب المجلفن Galvanized steel وفي بعض الأحيان يستخدم الألمنيوم في بعض الدول وخاصة في المناطق الجبلية لسهولة نقله بالطائرات السمتية (الهليكوبتر). ويركب على الهيكل العمودي الرئيسي أذرع مستعرضة من الحديد الصلب المجلفن لغرض حمل الموصلات والعوازل وسلك التأريض والفواصل الحديدية كما موضحة في الشكل 6-1.



الشكل 6-1 مكونات برج خط النقل.

كذلك تركب مخمدات التذبذب في الخطوط التي تنشأ بسبب تراقص الموصلات عند هبوب الرياح وكذلك تجمع الصقيع عليها، وتكون أنماط التذبذب على ثلاثة أنواع:

- تذبذب بشكل عدو الفرس Galloping : يتسبب هذا النوع من التذبذب عادة بسبب تراكم الصقيع على سطح الموصل حيث يتصرف المقطع العرضي للموصل وكأنه رقيقة هوائية Aerofoil وعند هبوب الرياح على الموصل ينتج تذبذب عدو الفرس وهو تذبذب له اتساعٍ عالٍ وتردد منخفضٌ جداً قد يصل ارتفاعه أكثر من متر وتردده 3 هرتز. وقد يؤدي هذا النوع من التذبذب إلي تلف في بنية البرج نفسه.

- التذبذب الرياحي Aeolian vibration : عند هبوب الرياح على الموصل باطراد تنشأ حواليه دوامات هوائية على الجهة الخلفية منه التي تسبب ما يعرف بالتذبذب الرياحي. اتساع هذا التذبذب يكون منخفضٌ جداً حوالي بالمليمترات أو السنتمترات لكن تردده يكون عالٍ نسبياً بحدود 150 هرتز. يسبب هذا التذبذب تلف في ضفائر(جدائل) الموصل على مدى الزمن الطويل. وتستعمل كرتين متصلتان فيما بينهما بقضيب تعشق إلى الخط بواسطة كلاب من نقطة في وسطها

كمخمدات لهذا النوع من التذبذب. وتركب هذه المخمدات في بداية ونهاية البون بين الأبراج. كذلك تزود هذه المخمدات لموصلات الأطوار وكذلك للسلك الأرضي.

- تذبذب الاستفاقة المحتث Wake induced vibration: ينشأ هذا النوع من التذبذب فقط في الموصلات الحزمية Bundled conductors حيث تؤثر القوى الديناميكية الهوائية الناشئة في أسفل مسار موصلات الخطوط ويكون اتساع هذا التذبذب بالسنتيمترات. ويتم تخفيض تأثير هذا التذبذب بجعل التباعد أكبر بين الموصلات المحزومة.

3-6 أنواع أبراج النقل للفولتيات العالية وتصنيفها

يعد البرج الناقل من أهم مكونات خط النقل إذ أن أداء الخط يعتمد بصورة كبيرة جداً على تصميم البرج. وتصنف الأبراج حسب شكل هيكلها كالآتي:

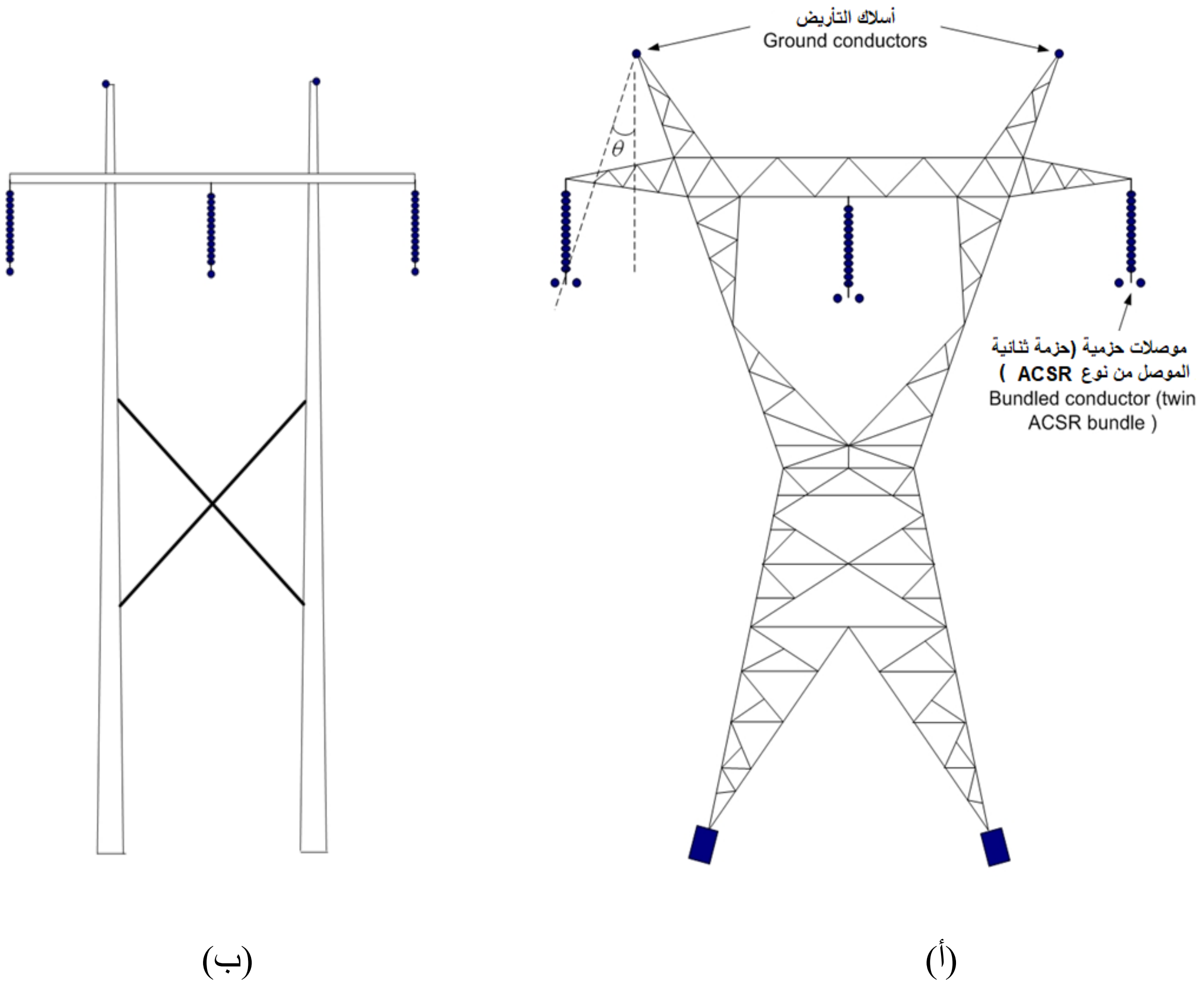
- الهيكل المشبك Lattice structure
- هياكل الأعمدة الأنبوبية Tubular Pole structure

وتستعمل أنواع عديدة من أشكال الأبراج والأعمدة الناقلة في الحياة العملية ولكن تركيزنا سينصب على أكثر الأنواع شيوعاً وهو النوع المشبك الذي نجده مستعمل من قبل أغلب شركات نقل الطاقة الكهربائية في مدن العالم، الشكل 6-2 (أ)، حيث أن هذا النوع يتسم بكون أجزاءه ومكوناته سهلة النقل والتركيب حتى في الأماكن التي يصعب الوصول إليها. إضافة لذلك فإن مكوناته قليلة الكلفة. لاكن من أهم محدداته ومساوئه هو المساحات المحرمة والأطوال الكبيرة على طول مساره التي يحتاجها للنصب التركيب والصيانة والتي تسمى عادة "حق الطريق" للخط Right of way (ROW). ويعتمد عرض الطريق على مقدار الفولتية التي ينقلها الخط فكلما كانت الفولتية أعلى كلما كان عرض الطريق أكبر حيث يتم بناء الخط في منتصفه وعلى طول مساره.

أما النوع الثاني وهو هياكل الأعمدة الأنبوبية فقد استعمل بنجاح من قبل بعض الشركات لنقل الفولتية العالية والعالية جداً. وقد وجد أن هذا النوع يمتاز بسهولة التركيب لكن كلفته عالية، أنظر الشكل 6-2 (ب) الذي يبين عمود نقل انبوبي على شكل حرف – H. ويمكن أن يصمم هذا النوع من أعمدة النقل لنقل دائرتين اثنين على البرج نفسه.

هناك نوع آخر من الأبراج المشبكة الذي استعمل أيضا من قبل بعض شركات نقل الطاقة وهو البرج المرشد الذي يكون شكله يشبه الحرف -V اللاتيني Guyed-V كما موضح في الشكل 6-3 (أ) . يمتاز هذا

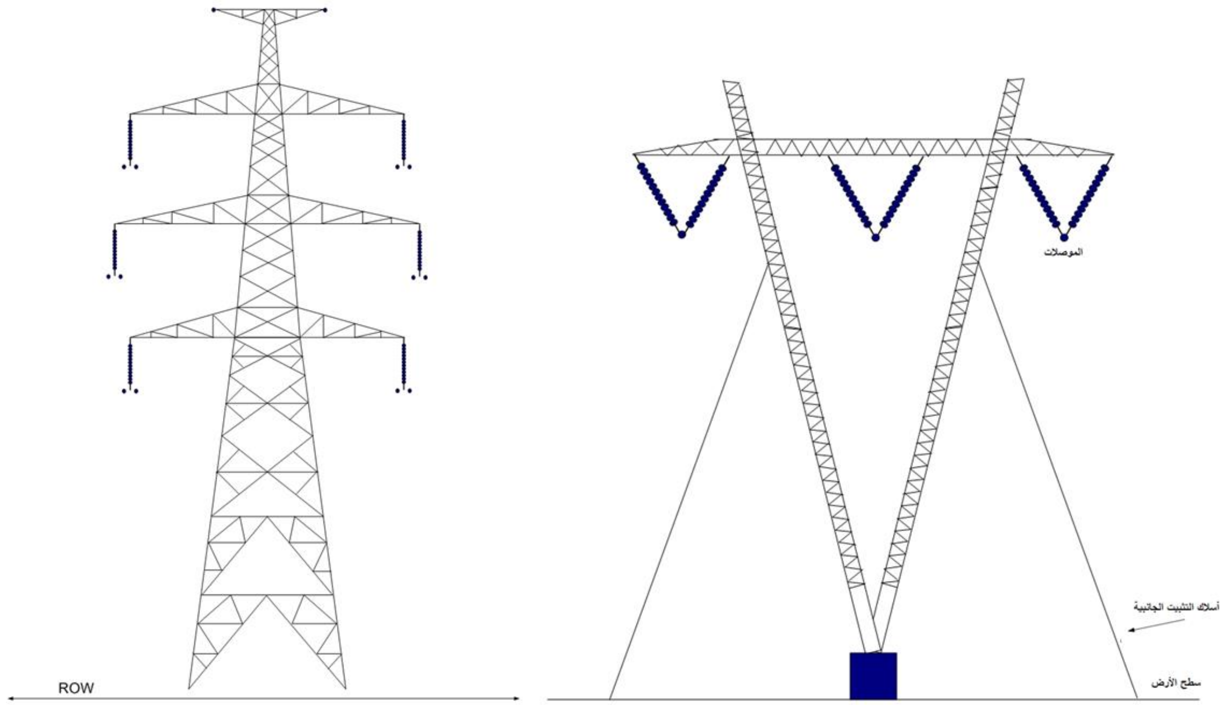
النوع من الأبراج ببساطته وسهولة التركيب وقلة التكاليف وزمن الإنشاء، لكن من مساوئه هو حاجته إلى فراغ أو مساحة أوسع بسبب تباعد الأسلاك الجانبية التي تثبته.



الشكل 6-2: (أ) برج مشبك يحمل دائرة واحدة ثلاثية الطور، (ب) عمود انبوبي الشكل حرف H - لنقل دائرة واحدة ثلاثية الطور.

ولأجل التوفير في عدد الأبراج وكلفتها ولنقل أكبر كمية ممكنة من الطاقة تصمم أبراج الفولتية العالية والفولتية العالية جداً HV/EHV بصورة عامة لحمل دائرتين ثلاثيتي الطور على البرج نفسه كما موضح في الشكل 6-3 (ب). ويعتمد عدد الأبراج المطلوب انشائها لكل كيلومتر على طول مساره وكذلك تضاريس الأرض. عليه من الواضح أن يزداد عدد الأبراج في المناطق الجبلية والمرتفعات والتضاريس الأرضية الصعبة.

وعندما ينحرف مسار الخط عن مساره المستقيم فانه يتطلب زيادة عدد الأبراج في منطقة الانحراف، في هذه الحالة تستخدم أبراج الزاوية Angle towers لهذا الغرض.



(ب) (أ)

الشكل 6-3 : (أ) البرج المرشد الذي شكله يشبه الحرف -V اللاتيني Guyed-V لحمل دائرة واحدة بواسطة عازلين اثنين لكل طور، (ب) برج مشبك لنقل دائرتين ثلاثيتي الطور.

إن مشروع تصميم وإنشاء خط نقل طاقة كبير بفولتيات عالية أو عالية جداً قد يتضمن التعامل مع أنواع عديدة من الأبراج الخاصة بهذه الفولتيات العالية. ومن الناحية الهندسية قد تكون هذه الأبراج هي أبراج ارتكازية أو أبراج شد أو أبراج تثبيت أو أبراج تفرع وكذلك عدد الدوائر التي تنقل الطاقة وترتيب الأسلاك أو الموصلات التي قد تكون إما في مستو واحد Single-level أو بمستويين اثنين Two-level أو برج بثلاث مستويات Three-level pylon.

على أية حال وبصورة عامة تأخذ الأبراج عادة مسمياتها من نوع العازل الذي تحمله يتم تصنيفها كما يأتي:

1- أبراج التعليق: وتمثل 80% من مجمل عدد أبراج خط النقل الاعتيادي وتكون وظيفتها حمل الموصلات فقط ولا يقع عليها أية قوى شد أفقية تذكر. أنظر الشكل 6-4 (أ).



(ب) **(أ)**

الشكل6-4: (أ) برج تعليق، (ب) برج شد.

2- أبراج الشد: وظيفة هذه الأبراج تحمل قوى الشد الميكانيكية إما في اتجاه واحد كتلك الأبراج التي تكون في بداية الخط أو في نهايته، أو من كلا الاتجاهين، الشكل 6-5 (ب)، وتركب هذا الأبراج عادة على مسافات مختارة من الخط أو عند عبور الخطوط للأنهار أو المناطق الجبلية شاسعة الأبوان. ويتم إضافة برج شد كل 7 إلى 9 أبراج تعليق لغرض تثبيت الخطوط بصورة عامة.

كذلك يتم تصنيف برج الشد وفقاً لزاوية العازل 30 أو 60 أو 90 درجة، وفي هذه الحالة تكون للزاوية وضعيتان:

- رأسية بالاتجاه العلوي: وتكون بأبراج الشد التي تسبق أو تلي أبراج عبور الأنهار أو عبور المناطق الجبلية الوعرة مباشرة. وذلك للمحافظة على انسيابية مرور الموصلات من خلال كلابات الشد المستخدمة كملحقات الخطوط.
- أفقية: وتستخدم لتغيير المسار الجغرافي للخطوط مع المحافظة على قوى الشد في الاتجاه نفسه.

3- أبراج التبادل: وتستخدم هذه الأبراج لتبادل مواضع الموصلات لغرض تقليل محاثة الخطوط ومتسعاتها بحيث تتم المحافظة على تسلسل الأطوار في بداية الخط ونهايته حيث يقسم طول الخط الى ثلاثة أقسام متساوية الطول يتم خلالها إبدال المواضع للأطوار الثلاثة كما تم شرح ذلك في الفصلين الثاني والثالث. أنظر الشكل 6-5.

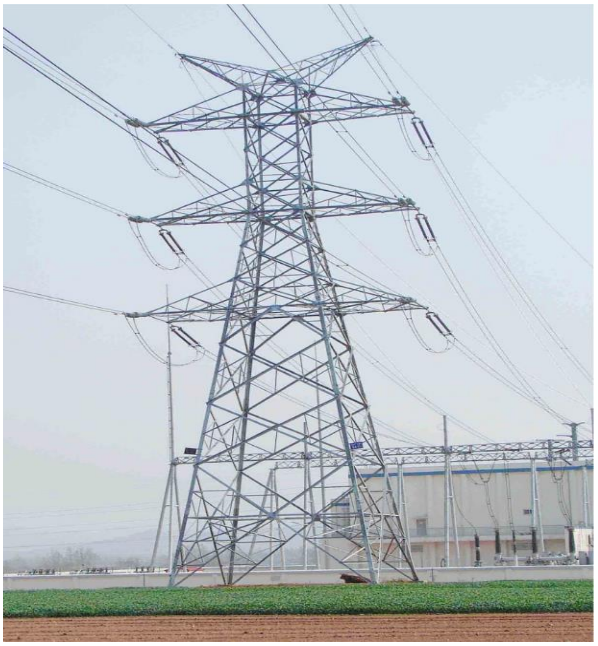


الشكل 6-5 برج نموذجي لتبادل مواضع الموصلات Transposition tower.

4- أبراج عبور الأنهار والموانع الجغرافية: وهي أبراج تعليق بتحوير بسيط وتكون ارتفاعاتها عالية قد تصل إلى ارتفاع أكثر من 150 متر، أنظر الشكل 6-6 (أ). ولا توجد ارتفاعات قياسية محددة لأبراج العبور ولكن ارتفاعاتها تتحدد بالموقع الجغرافي والخلوص العمودي لفولتية الخط المستعملة.

5- الأبراج الطرفية Dead end towers: توضع هذه الأبراج عند نهاية الخط أوعند الدخول إلى محطات التحويل الثانوية أو محطات التوليد وتصمم لتتحمل انقطاع الأطوار الثلاثة من جانب واحد. أنظر الشكل 6-6 (ب).

أما أسس وقواعد الأبراج فإن انواعها تعتمد بصورة رئيسية على نوع التربة التي يراد انشاء البرج عليها. على أية حال فهناك بعض أنواع القواعد والأسس الشائع والمعروف استخدامها للترب الجافة والرطبة والصخرية والرملية والترب المغمورة بالمياه. ويجب أن تأخذ المناطق التي تتأثر بالزلازل بعين الاعتبار وكذلك شواطئ الأنهار ومقترباتها.

(ب) (أ)

الشكل 6-6 : (أ) برج عبور نهر ذو ارتفاع عالٍ، (ب) الأبراج الطرفية.

4-6 حسابات التدلي والإجهاد Sag and Stress Calculations

عندما يتم نقل الطاقة الكهربائية بواسطة الأسلاك والموصلات المحمولة على الأبراج الناقلة يجب الأخذ بعين الاعتبار دراسة وتحليل التدلي والشد الميكانيكي الذي يحصل طبيعيا في هذه الأسلاك. هذه الدراسة تكون مهمة جداً في تصميم خطوط التوزيع ونقل الطاقة على حد سواء لضمان عدم تعرضها للفشل والانهيار وقطع امدادات الطاقة عن المدن والمصانع والمرافق الحيوية الأخرى.

إن استمرارية تجهيز القدرة ونوعيتها المجهزة خلال الخطوط (بغض النظر عن كونها خطوط توزيع أو خطوط نقل) تعتمد بصورة كبيرة على طريقة تثبيتها وبنائها بصورة جيدة. لذا فان المهندس المصمم يجب عليه مسبقا أن يحدد مقدار التدلي وكذلك مقدار الشد الذي يعطى إلى السلك لخط معين في درجات حرارة معينة في فصلي الصيف والشتاء.

إن مقدار الشد في الأسلاك (الموصلات) يساهم في كمية الحمل الميكانيكي على الأبراج الناقلة وخاصة في النهايات الميتة وقد يؤدي الشد المفرط إلى انقطاع الموصلات نفسها وحدوث فشلها الميكانيكي.
أما العوامل المؤثرة على التدلي في السلك الموضوع بين الأعمدة أو الأبراج فهي:

1- وزن الموصل (السلك) لكل وحدة طول.
2- البون (وهو المسافة بين برج وآخر يليه).
3- درجة الحرارة.
4- مقدار الشد الميكانيكي في الموصل.

ولأجل حساب الحمل الكلي للموصل بصورة جيدة فنحتاج إلى أخذ العوامل الآتية بعين الاعتبار:

1- وزن الموصل نفسه.
2- وزن الجليد أو الثلج المتراكم عليه (إن وجد).
3- سرعة الرياح التي تهب على الموصل.

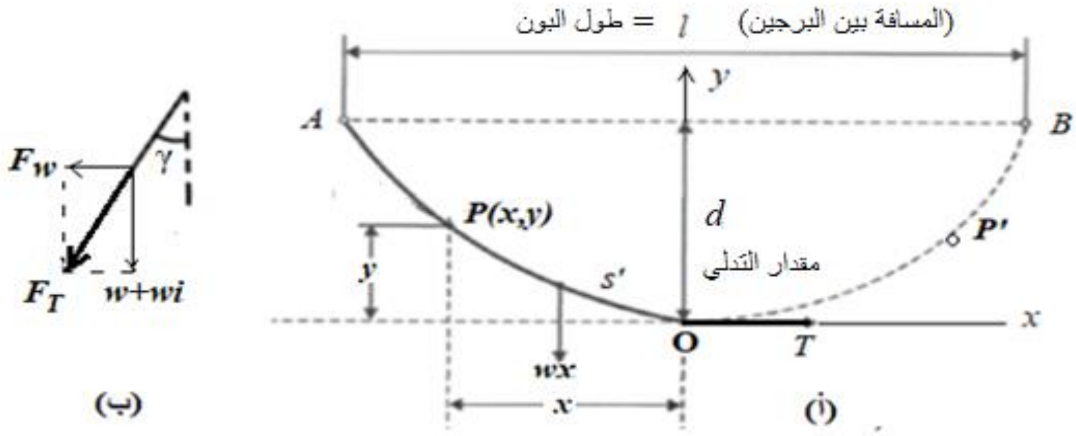
إن الوزن الفعال الأقصى للموصل هو المجموع الاتجاهي للوزن الشاقولي وضغط الرياح الأفقي الذي يؤخذ كونه يؤثر بصورة عمودية (بزاوية قائمة) على الخط ويكون عمله ضد مسقط المساحة للموصل نفسه بضمنه مسقط مساحة الجليد أو الثلج المتراكم عليه. كذلك من الضروري جداً أن تؤخذ الظروف الجوية السيئة والقاسية بالحسبان.

بصورة عامة توجد طريقتان لحساب التدلي في الأسلاك

- الطريقة الأولى وقوانينها عندما يكون شكل منحنى التدلي قطع مكافئ Parabola
- الطريقة الثانية وقوانينها عندما يكون شكل منحنى التدلي منحنى سلسلي Catenary

1-4-6 القطع المكافئ Parabola: حساب التدلي في الأسلاك عندما تكون الأبراج في مستوٍ واحد

لنتأمل في خط علوي معلق كما في الشكل 6-7 (أ) مثبت بين نقطتين A وB في مستوى واحد. لنفترض أن الخط مرن تماماً بحيث يتدلى تحت المستوى AB بسبب وزنه المنتظم. هذا الخط سيكون شكله بشكل منحنى سلسلي Catenary (أنظر كتب الرياضيات ذات العلاقة والفقرة 6-4-2). هذا الشيء ينطبق تماماً على خطوط الجهد الفائق ذات البون الطويل والتدلي الكبير، لكن في حالة كون المسافات بين الأبراج قصيرة ولها تدلي صغير فمن المعتاد أن نفترض أن الخط مشدود إلى درجة بحيث أن هيأته تكون على شكل قطع مكافئ Parabola معادلته العامة هي $y = ax^2$ حيث أن a هو ثابت لخط معين وO هي نقطة الأصل. ولأجل تبسيط الحسابات الرياضية سوف نفترض أن الشد في الموصلات يكون منتظماً على طول المسافة بين الأبراج.



الشكل 6-7 (أ) يبين خطا علوياً معلقاً مثبت بين نقطتين A وB في مستوى واحد (أ) نمط قطع مكافئ (طول القوس $P`OP = s = 2s`$)، (ب) تأثير قوة الرياح F_w.

أفرض أن:

l = البون = المسافة الأفقية بين الأعمدة بالمتر

d = التدلي عند منتصف البون بالمتر

عندئذ d = yعندما تكون $x = l/2$ وتكون معادلة الثابت a:

$$a = \frac{4d}{l^2} \tag{6.1}$$

$$y = 4d(\frac{x}{l})^2 \tag{6.2}$$

تبصر الآن في توازن نصف الخط OA.

أفرض أن:

T = الشد (نيوتن) عند النقطة O (يفترض أنها ثابتة على طول البون) وأفرض أن:

w = وزن الموصل نيوتن / م

وإذا افترض أن الموصل يكون أفقياً تقريباً وأخذنا العزوم حول النقطة A فان:

$$T \times d = (wl/2) \times (l/4)$$

ومن ثم نحصل على معادلة التدلي:

$$d = (wl^2)/8T \tag{6.3}$$

وبحذف d بين المعادلتين (6.2) و (6.3) نحصل على:

$$y = wx^2/2T \tag{6.4}$$

$$a = \frac{w}{2T} \tag{6.5}$$

لقد بينت الأنظمة للخطوط العلوية المعلقة مقدار ارتفاع حيز الخلوص الأدنى للخطوط التي فوق الأرض وتم تحديد قيمها، وإذا أضفنا التدلي الحاصل في الأسلاك إلى ذلك فيمكننا عندئذ إيجاد ارتفاع نقاط تثبيت العازل A و B. وتنص الأنظمة على أن التدلي يجب أن يحسب تحت أسوأ الظروف الموصوفة وبالتحديد هي أن يكون الخط في درجة حرارة °22 فهرنهايت (6.7 مئوية) ومغطى بالثلج بسمك مقداره 0.96 سنتمتر ويزن الثلج 8900 نيوتن / م³ وفي نفس الوقت يتعرض إلى رياح سرعتها 80 كم / ساعة تؤثر بزاوية قائمة على الخط بحيث يكون الضغط على الخط بحدود 378 نيوتن / م² من المساحة الكلية المعرضة لتأثير الرياح: كما يجب أن لا يزيد الشد الأقصى في الخط تحت هذه الظروف على نصف شد القطع للخط .

- **تأثير وزن الثلج المتراكم حول الموصل**

خذ الآن موصل طوله l متر كما موضح في الشكل 6-8 وافرض أن:

d_c = قطر الموصل بالمتر

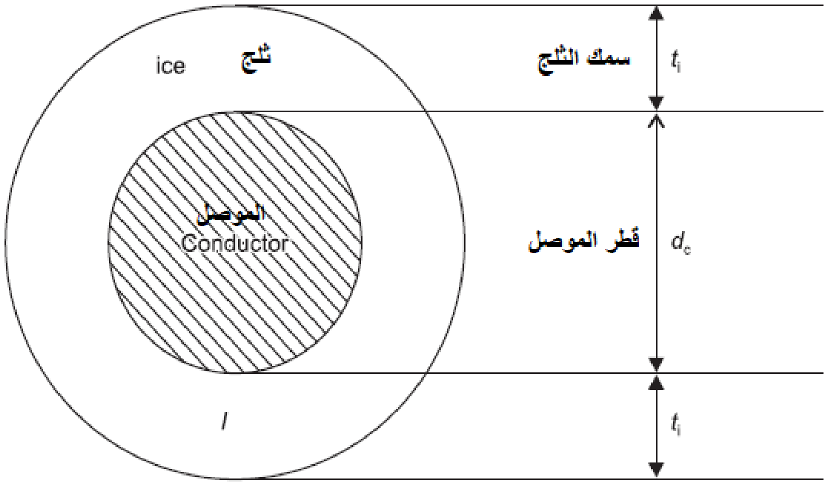
t_i= السمك العرضي للثلج بالمتر

D = القطر الكلي للموصل المغطى بالثلج = $d_c + 2t_i$ متر

وزن الثلج على الموصل هو :

$$w_i = (D^2 - d_c^2)\ 2225\pi$$

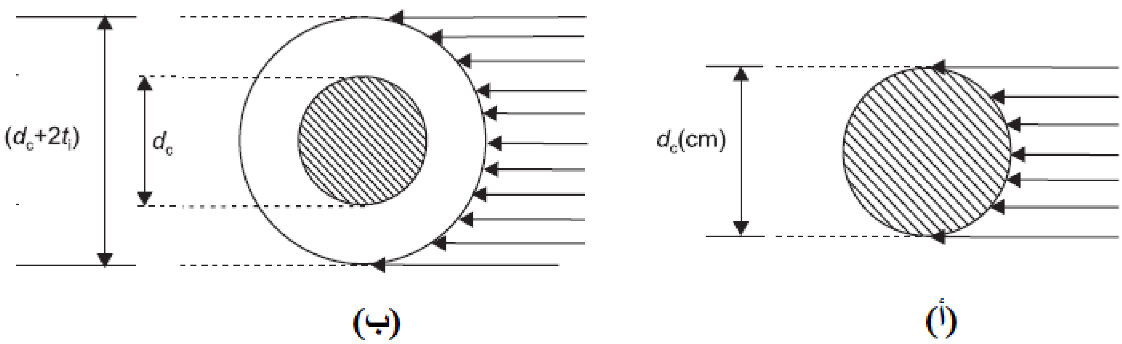
$$= 2.8 \times 10^4 t_i(d_c + t_i) \quad N/m \tag{6.6}$$



الشكل 6-8 تراكم الثلج فوق الموصل لخط نقل علوي.

- تأثيرقوة الرياح

تؤثر الرياح التي تهب على موصلات الخطوط بصورة أفقية على مسقط المساحة الأفقية للموصل وحسب ما يبينه الشكل 6-9 لتأثير قوة الرياح على الموصل في الحالتين عندما يكون غير مغطى بالثلج وعندما يتراكم عليه مقدار من الثلج .



الشكل 6-9 : محصلة قوة الرياح F_w (أ) عندما يكون الموصل غير مغطى بالثلج ، (ب) عندما يكون الموصل مغطى بالثلج.

محصلة قوة الريح على الموصل هي (أنظر الشكل 6-7 ب والشكل 6-9 ب)

$$F_w = 378 \times D \quad N/m \tag{6.7}$$

أما انحراف الموصل عن المستوي الشاقولي بزاوية مقدارها γ بسبب الريح فنجدها من الشكل 6-7 (ب) كالآتي:

افرض أن F_T = القوة الكلية الفاعلة على الموصل لكل متر من الموصل حيث تكون

$$F_T = \sqrt{F_W^2 + (w + w_i)^2}\ N/m \tag{6.8}$$

هذه القوة يجب أن تقع في المستوي الجديد الذي ينحرف اليه الموصل بحيث أن زاوية الانحراف يمكن ايجادها من المعادلة التالية:

$$\tan\gamma = F_W/(w + w_i) \tag{6.9}$$

وتجدر الإشارة إلى أن المعادلات (6.1) إلى (6.5) لا تزال ممكنة التطبيق على شرط أن جميع القياسات يجب أن تجرى في المستوى الجديد للموصل وعلى أن تستبدل w بـ F_T . وإذا كانت F_T هي القوة الكلية لكل متر على الموصل تحت أسوأ الظروف وTهو الشد النهائي المعرف بالأنظمة فعندئذ يكون التدلي في المستوى الجديد من المعادلة (6.3) هو:

$$d = F_T l^2/8T \tag{6.10}$$

والتدلي المقاس شاقولياً يكون: $d\ cos\ \gamma$

من الضروري الآن أن تحصل على تعبير رياضي تقريبي للطول الفعلي (المنحني) لنصف طول الخط (s`) مفترضين أنه يتخذ شكل قطع مكافئ. تبصر في مثلث صغير قائم الزاوية على القطع المكافئ $y = ax^2$ فعندئذٍ:

$$(ds`) = (dx)^2 + (dy)^2$$

$$(ds`/dx)^2 = 1 + (dy/dx)^2 = 1 + 4a^2x^2$$

$$ds` = (\sqrt{1 + 4a^2x^2}dx \simeq (1 + 2a^2x^2)dx$$

بما ان $a = 4d/l^2$ تكون صغيرة، فبالتكامل

$$s'_x = x + \left(\frac{2a^2x^3}{3}\right) + K$$

حيث أن ثابت التكامل $K = 0$ لأن $s' = 0$ عندما $x = 0$ وهكذا فان

$$s'_x = x + 2a^2x^3/3 \qquad (6.11)$$

لاحظ أن s'_x هي مسافة المنحني من O الى $P(x, y)$ ، وإذا كانت s هي المسافة المنحنية المضاعفة $2s'_x$ فان طول المنحني الكلي للقطع المكافئ يكون، من المعادلة (6.1):

$$s = l + 8d^2/3l \qquad (6.12)$$

وبالتعويض من المعادلة (6.10) فان طول المنحنى الكلي يكون:

$$s = l(1 + F_T^2 l^2/24\,T^2) \qquad (6.13)$$

وإذا تعرض خط إلى مجموعة ظروف فيزيائية يشار إليها بالرمز السفلي 1 ثم تعرض إلى مجموعة ظروف فيزيائية أخرى يشار اليها بالرمز السفلي 2 فيمكننا اشتقاق علاقة رياضية تربطهما وكما يلي:

إذا ازداد الشد في الموصل من T_1 إلى T_2 عندئذ ستكون استطالة الموصل الجديدة هي: $s_1(T_1 - T_2)/AE$ حيث أن A هي مساحة مقطع الموصل. وإذا ازداد ت درجة الحرارة من θ_1 إلى θ_2 فان تمدد الموصل سيكون $\alpha s_1(\theta_1 - \theta_2)$. وهكذا فان

$$s_1 + s_2(T_2 - T_1)/AE + \alpha s_1(\theta_2 - \theta_1) = s_2 \qquad (6.14)$$

وبالتعويض عن s_1 و s_2 من المعادلة (6.13) ، وباستعمال مفكوك ذي حدين وبإهمال حدود الدرجة الثانية ، فالمعادلة (6.14) ستقلص إلى

$$(l^2/24)(F_{T2}^2/T_1^2) = (T_2 - T_1)/AE + \alpha(\theta_2 - \theta_1) \qquad (6.15)$$

المعضلة العملية هنا تكمن في حل المعادلة (6.15) لإيجاد قيمة T_2 وذلك بإعادة ترتيبها كما يلي .

$$T_2^2\left[T_2 - \left\{T_1 - \alpha AE(\theta_2 - \theta_1) - \frac{AEF_{T1}^2 l^2}{24T_1^2}\right\}\right] = AEF_{T2}^2 l^2/24 \qquad (6.16)$$

المعادلة (6.16) تعطى قوة الشد T_2 في الخط اثناء عملية النصب وكأنه قد تعرض إلى أسوأ الظروف (كما نصت عليه الأنظمة)، عليه فان الشد على الخط سوف لا يتعدى قيمة T_1 الذي هو يمثل نصف حمل القطع للخط. أما حساب التدلي وارتفاع الخط فوق الأرض (ارتفاع حيز الخلوص) في وقت النصب فيجب أن

يصممان بحيث أن ارتفاع حيز الخلوص لا يصل إلى أقل من الحد الأدنى القانوني في أي وقت معين في المستقبل. عليه فالمعادلة (6.16) يمكن أن تكتب بالشكل التالي:

$$T_2^2(T_2 - a) = b \qquad (6.17)$$

هذه المعادلة التكعيبية يمكن حلها بسهولة باستخدام الحاسبات اليدوية Calculators الحديثة لإيجاد قيمة T_2 .

2-4-6 الأبوان ذات الأطوال غير المتساوية: البون المكافئ

Span of Unequal Length: Equivalent Span

عند تعليق خط يتألف من عدة أجزاء بمسافات غير متساوية على عوازل التثبيت الخاصة بها، فانه من المستحسن كثيرا أن تعلق هذه العوازل بصورة شاقولية. وهكذا عند كل نقطة تثبيت يجب أن تكون المركبات الأفقية لقوة الشد للأجزاء المتجاورة متساوية. لكن إذا تم تعليق كل جزء وفقاً للصيغة التي طرحت في الفقرة السابقة فان الشد الناتج في الأجزاء سوف لا يكون بالضرورة متساوياً.

إن الشد يجب أن يصمم ليكون متساوياً عن طريق تعريف بون مكافئ l_e وجعله الأساس في كل الحسابات الخاصة به. لكن هناك شرطان لجواز صحة هذا الحل: أولهما أن يكون المجموع الكلي للأبوان الأفقية متساوياً؛ والمجموع الكلي للأطوال المنحنية متساوياً فيما يخص الخط الفعلي والخط المكافئ.
فإذا كانت هناك أجزاء عددها n فان:

$$nl_e = \sum l \qquad (6.18)$$

وباستعمال المعادلة (6.14) نحصل على

$$n(l_e + w^2 l_e^3/24T^2) = (\sum l) + w^2(\sum l^3)/24T^2 \qquad (6.19)$$

بتعويض المعادلة (6.18) في المعادلة (6.19) نحصل على:

$$l_e^2 = (\sum l^3)/nl_e = \sum l^3 / \sum l$$

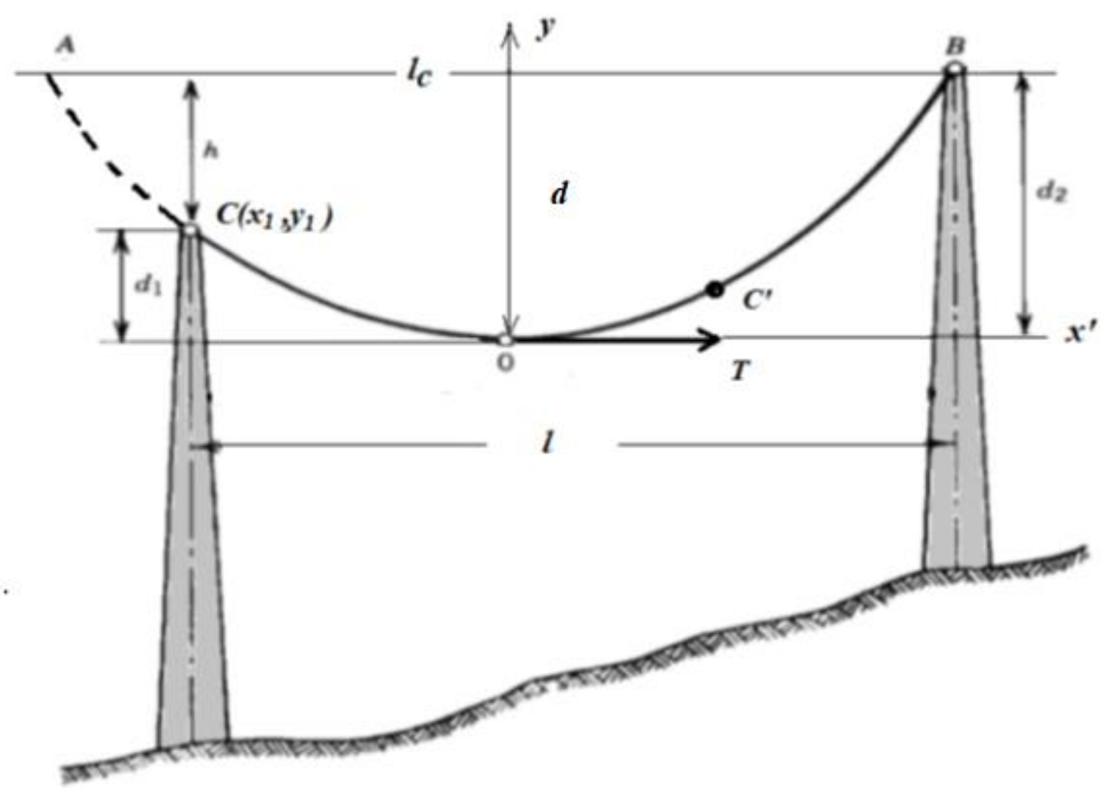
$$l_e = \{(l_a^3 + l_b^3 + \cdots)/(l_a + l_b + \cdots)\}^{\frac{1}{2}} \qquad (6.20)$$

حيث أن هذه الأبوان هي الأجزاء c,b,a...الخ. وبمعرفة l_e فان الشد T_2 ، الذي ستشيد بموجبه كل الأجزاء، يمكن ايجاده.

3-4-6 أعمدة تثبيت التي تقع في مستويات مختلفة

SUPPORTS AT DIFFERENT LEVELS

يبين الشكل 6-10 خطاً معلقاً بين نقطتي تثبيت B وC تقعان بمستويين مختلفين ، ليكن الطول BoCA يمثل القطع المكافئ الكامل والنقطتين A وB تقعان في مستوى واحد حيث يفترض أن يكون الخط الفعلي l بين B وC جزءاً من هذا القطع المكافئ.



الشكل 6-10 أعمدة تثبيت تقع بمستويات مختلفة.

أفرض أن:

l_c = بون القطع المكافئ الكامل (بين A وB)

l = طول بون الخط الفعلي

عليه فإن

$$x_1 = l - \frac{l_c}{2} \qquad (6.21)$$

وحيث أن معادلة القطع المكافئ $y = ax^2$ يمكن أن تنطبق على مقطعي الطول BoC وعلى BoA ، لذا فالمعادلة (6.4) بالإمكان تطبيقها أيضاً لإيجاد مقدار التدلي في السلك d حيث ينتج من ذلك:

$$d = \frac{wl_c^2}{8T} \qquad (6.22)$$

ومن المعادلة (6.5) نجد أن

$$x_1^2/(d-h) = l_c^2/4d \qquad (6.23)$$

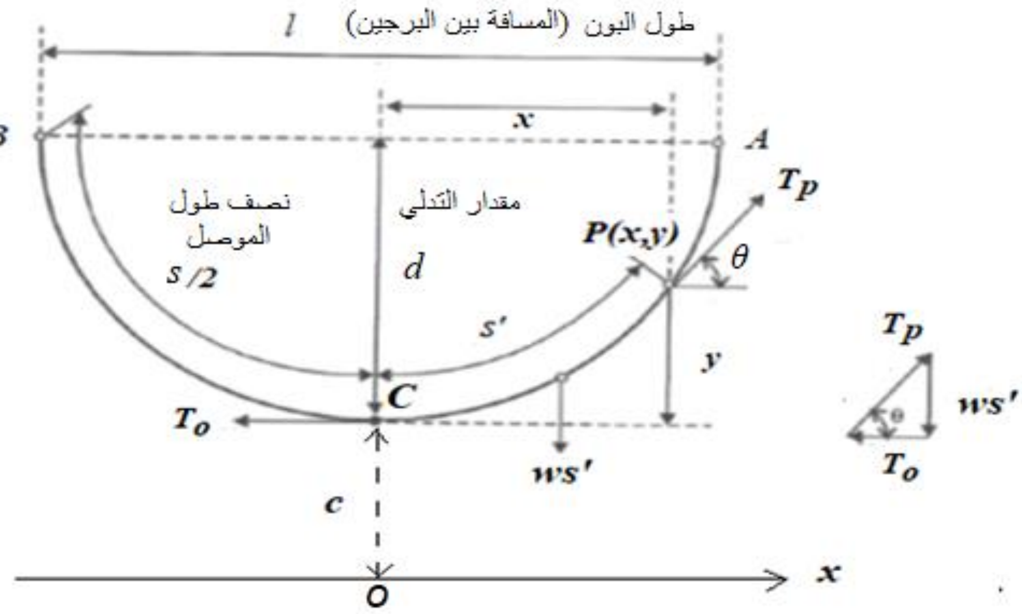
وبحذف d نحصل على

$$l_c = l + \frac{2Th}{wl} \qquad (6.24)$$

هذا الشرح النظري في أعلاه يبقى صحيحاً حتى وإن كان طول الخط المنحني BC أقل من BO، أي أن مستوى الأرض يكون منحدرا كثيراً بحيث أوطأ نقطة في القطع المكافئ سوف تقع خارج الجزء الفعلي للخط (مثلا `BC) . وبمعرفة l_c يمكننا تطبيق ماورد من قوانين في الفقرة 6-4-1.

6-4-4 طريقة إيجاد التدلي عندما يكون المنحني بشكل سلسلي CATENARY

في خطوط الفولتيات العالية جداً يجب أن تستخدم الصيغ الرياضية الخاصة بالمنحني السلسلي أينما كان التدلي أكبر من عشر البون تقريباً . فبالإشارة إلى الشكل 6-11 (أ)، فالجزء CP يكون في حالة توازن تحت ثلاث قوى وهي T_o الشد الأفقي عند أوطأ نقطة C و T_p الشد عند P و `$ws$ وزن الجزء العامل شاقولياً إلى الاسفل. هذه القوى الثلاث يجب أن تلتقي عند النقطة التي تقرر خط فعل s ، والعلاقات بين هذه القوى يمكن أن تستنتج من الشكل 6-11 (ب). وخيث أن طول جزء من المنحنى السلسلي هو `s بينما الطول المناظر لجزء المنحنى السلسلي المعلق من نقطتين على مستوى واحد هو $s = 2s$`.



الشكل 6-11تدلي الموصل عندما يأخذ شكل المنحني السلسلي Catenary .

تأمل الآن في مركبات القوى الشاقولية والأفقية

$$T_p sin\theta = ws/2 \qquad (6.25)$$

$$T_p cos\theta = T_o \qquad (6.26)$$

ومن المناسب أيضاً كتابة

$$T_o = wc \qquad (6.27)$$

لذلك يمكن اعادة كتابة المعادلة (6.26) كما يلي

$$T_p cos\theta = wc \qquad (6.28)$$

حيث ان c تدعى بمعلم Parametr المنحنى السلسلي. من (6.25) و (6.28)

$$s` = c\tan\theta = s/2 \qquad (6.29)$$

الطول المنحني من المنحنى السلسلي s يمكن ايجاده بالطريقة المستعملة للقطع المكافيء (الفقرة6-4-1) وكما هو معطى بالمعادلة:

$$s = c \sinh (x/c) = s/2 \qquad (6.30)$$

والتي يمكن اعادة كتابتها باستعمال المعادلة (6.29) وكما يأتي

$$s` = (T_o/w) sinh\ (wx/T_o) = s/2 \qquad (6.31)$$

وبتعويض dy/dx بدلاً من $\tan\theta$ في (6.29) واخذ التكامل نحصل على المعادلات

$$y = c \cosh(x/c) \qquad (6.32)$$

$$y = (T_o/w) cosh\ (wx/T_o) \qquad (6.33)$$

$$y - c = (T_o/w)\{\cosh(wx/T_o) - 1\}$$

$$= \frac{wx^2}{2T_o}\left\{1 + (\frac{x^2}{12})(\frac{w}{T_o})^3 + \cdots\right\} \qquad (6.34)$$

المعادلة (6.34) تعطينا مقارنة بين معادلات المنحنى السلسلي والقطع المكافيء المكافئة التي لها $c = 0$ خلال أسوأ ظروف تحميل للخط $T_o = T_1$ و $w = F_T$ وخلال ظروف التشييد $T_o = T_2$.

من المعادلات (6.30) و (6.31) و (6.32) و (6.33) نحصل على

$$y^2 = c^2 + (s`)^2 = c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2 \qquad (6.35)$$

ومن المعادلات (6.25) و(6.27) و(6.35)

$$T_p = wy \qquad (6.36)$$

من المعادلات (6.27) و (6.32) و(6.36)

$$T_p = T_o \cosh(x/c) \qquad (6.37)$$

$$= T_o \cosh\left(\frac{wx}{T_o}\right) \qquad (6.38)$$

كلما ازدادت x , ستزداد T_p لقيمة معينة من T_o هوالشد الأدنى في الخط . تبصرالآن في المنحنى السلسلي الكامل ذي البون l وضع $X = 1/2$ وبفك المتوالية اللإنهائية نحصل على الصيغ التالية ٠ طول الموصل s يكون معطى بالمعادلة:

$$s = (2T_o/w)sinh\ (w/2T_o) \qquad (6.39)$$

$$= l\left\{1 + (\frac{l^2}{24})(\frac{w}{T_o})^2 + (\frac{l^4}{1920})(\frac{w}{T_o})^4 + \cdots\right\} \qquad (6.40)$$

التدلي d يعطى بالمعادلة

$$d = (T_o/w)\{\cosh\left(\frac{w}{2T_o}\right) - 1\} \qquad (6.41)$$

$$= \frac{wl^2}{8T_o}\left\{1 + \left(\frac{l^2}{48}\right)\left(\frac{w}{T_o}\right)^2 + \cdots\right\} \qquad (6.42)$$

والشد عند نقطة التثبيت A يكون

$$T_A = T_o \cosh(wl/2T_o) \qquad (6.43)$$

$$= T_o + wS \qquad (6.44)$$

اذا أردنا أن نسحب الخط بشدة بحيث يصبح خط مستقيماً افقياً . فعندئذ $s` = x$ والمعادلة (6.31) تصبح

$$(s`/c) = \sinh(x/c)$$

بما أن هذه المعادلة يجب أن تكون حقيقية لكل قيم x كما أنها تكون حقيقية أيضاً لـ $s` = x = 0$

فعندئذ $c \to \infty$ و $.w/T_o = 1/c \to 0$

أما أقصى شد للموصل فيمكن إيجاد قيمته بالمعادلة التالية

$$T_{max} = w\ (c + d) \qquad (6.45)$$

مثال 6-1

موصل في خط نقل معلق بحرية بين برجين وقد أخذ هذا الموصل شكل منحني سلسلي له ثابت مقداره

c = 487.68 . طول البون بين البرجين 152 متر ووزن الموصل 1.16 كيلوغرام/ متر . احسب الآتي:

(أ) طول الموصل (ب) التدلي

(ج) أعظم وأقل قيمة للشد في الموصل

(د) القيمة التقريبية للشد باستخدام طريقة القطع المكافئ

الحل :

(أ) نجد طول الموصل بواسطة المعادلة (6.39)

$$s = (2T_o/w) sinh\ (w/2T_o)$$

$$c = T_o/w$$

$$s = 2c(sinh\ (l/2c))$$

بتعويض قيم c و l في المعادلة أعلاه

$$s = 2 \times 487.68\ (sinh\ (152/2 \times 487.68)) = 152.576\ m$$

(ب) لايجاد مقدار التدلي نطبق المعادلة (6.41)

$$d = (T_o/w)\{\cosh\left(\frac{w}{2T_o}\right) - 1\}$$

$$d = c\ \left\{\cosh\left(\frac{l}{2c}\right) - 1\right\} = 487.68\left\{\cosh\left(\frac{152}{2487.68}\right) - 1\right\} = 5.98\ m$$

(جـ) لإيجاد أقصى أو أعظم قيمة للشد نستعمل المعادلة (6.45)

$$T_{max} = w\ (c + d)$$

$$T_{max} = 1.16\ (487.68 + 5.98) = 572.6\ kg$$

باستتخدام المعادلة (6.27) يمكن إيجاد القيمة الدنيا للشد في الموصل

$$T_o = wc = 1.16 \times 487.68 = 565.70\ kg$$

(د) من المعادلة (6.3) الخاصة بالقطع المكافئ

$$d = \frac{wl^2}{8T} = \frac{1.16 \times (152)^2}{8T} = 5.98$$

$$\therefore T = \frac{wl^2}{8T} = \frac{1.16 \times (152)^2}{8 \times 5.98} = 564.5\ kg$$

نلاحظ مما سبق أن كل بنية أو تركيب يجب أن يصمم وفق الأحمال التي يتعرض لها البرج الناتجة عن وزن الموصلات وهبوب الرياح وتراكم الثلوج وغيرها. كذلك فتصميم البرج أو الأعمدة يجب أن يستوفي متطلبات الأنظمة والمواصفات العامة والفنية لتلك الدولة التي سوف ينشأ فيها البرج. ويعد تصميم الأبراج والخطوط من الأمور الصعبة والمعقدة وهناك شركات متخصصة في تصميم الأبراج تستعمل برامج خاصة ودقيقة لهذا الغرض. لكن المهندس البسيط يمكنه مثلاً أن يجري بسهولة حساب أبعاد وارتفاع البرج الاعتيادي كما في المثال البسيط الآتي :

مثال 6-2

إشارة إلى الشكل 6-4 احسب الأبعاد الرئيسية لبرج ناقل لفولتية 750 كيلو فولت لدائرين ثلاثيتي الطور. استعمل عازل سلسلي كل وحدة منه يمكنها أن تتحمل 20 كيلو فولت وارتفاعها 25 سنتمتر.

الحل : بداية يجب حساب عدد وحدات العازل المطلوب :

750/20= 37.5 +4 ≈42

هنا تم إضافة 4 وحدات كاحتياط.

ارتفاع كل وحدة عزل هو 25 سنتمتر بفولتية عزل 20 كيلو فولت فالبعد القانوني المطلوب عن الأجزاء المؤرضة من البرج أو السلك الأرضي نفسه هو 10.5 متر. أما ارتفاع العازل الكلي S_A فيكون

$$S_A = 42x\ 0.25 = 10.5\ m.$$

المسافة S_B تحسب : S_B= المسافة اللازمة لعزل الهواء لـ 750 كيلو فولت +عامل أمان

بالنسبة لفولتية 750 كيلوفولت نجد في المراجع أن S_B يجب أن تكون 10.5 متر في الأقل .

مجموع ارتفاعات المسافات S_A و S_B:

$$3x\ S_A+2x\ S_B=10.5\ x\ 3 + 10.5\ x\ 2 = 52.5\ m$$

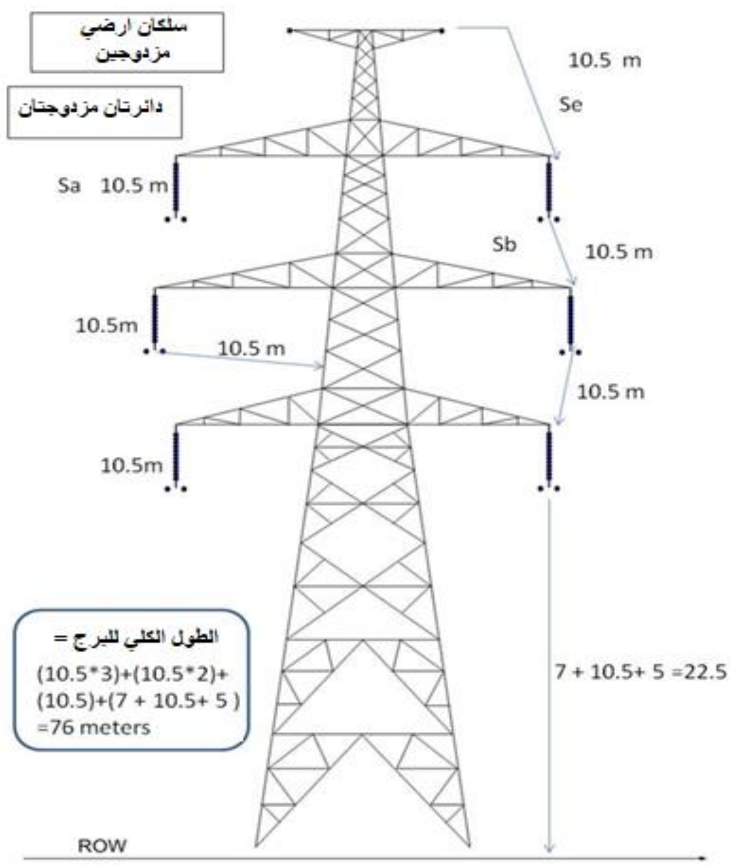
للسلك الأرضي:

$$S_E = 10.5\ m$$

أفرض أنه في حسابات التدلي التي وٌجِدَ أن التدلي في الأسلاك هو $S_0 = 5\ m$ وأن المسافة بين نقطة التدلي والأرض = 7 متر لذا يكون ارتفاع البرج الكلي :

$$7 + 10.5 + 5 + 52.5 = 76\ m$$

الأبعاد المحسوبة في أعلاه موضحة في الشكل 6- 12 .



الشكل 6-12 أبعاد البرج للمثال 6-2.

الفصل السابع

محولات القدرة الكهربائية TRANSFORMERS

1-7 مقدمة

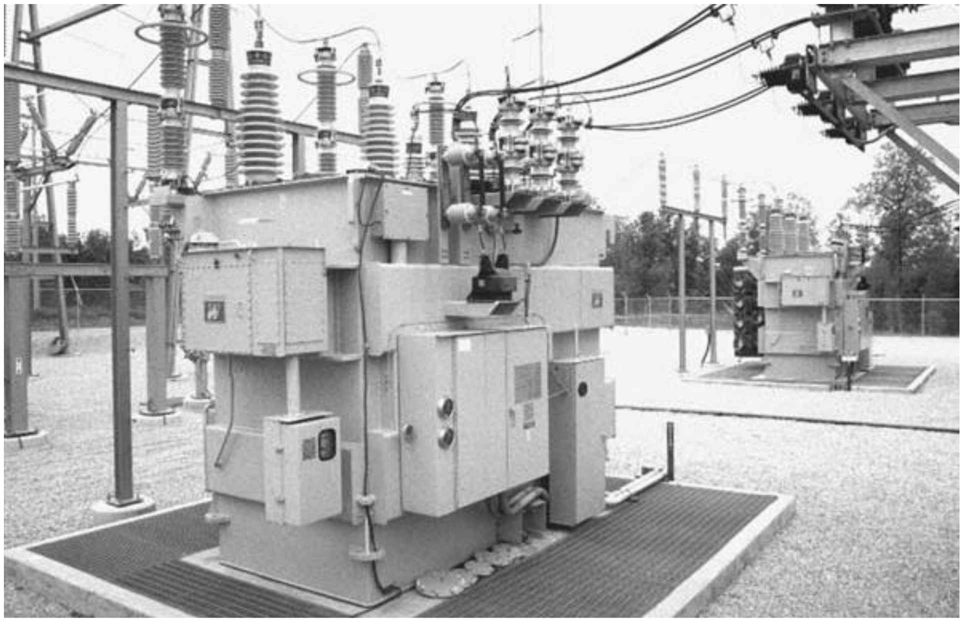
المحول الكهربائي هو جهاز لنقل الطاقة الكهربائية من دائرة إلى أخرى، وله القدرة على خفض أو رفع الفولتية من قيمة إلى أخرى ولكن ذلك يتبعه تغير معاكس فى التيار بمعنى إن رفع الفولتية يصاحبها خفض في التيار والعكس صحيح. وتسخدم المحولات الرافعة للفولتية لنقل الطاقة الكهربائية عبر مسافات بعيدة دون التأثير على الهبوط بالفولتية وتبعاتها. كذلك يساعد نقل الطاقة بفولتيات عالية جداً على استخدام موصلات بمساحات مقاطع عرضية صغيرة وذلك لأن التيار سوف يكون أقل كلما ارتفعت الفولتية وبذلك تقل كلفة أبراج النقل بصورة كبيرة. هذا يعني أنه يكون هنالك تكاملاً إقتصادياً إلى جانب التكامل الفني بين خطوط النقل ومحولات الفولتية.

غالباً ما توضع المحولات في محطات ثانوية تنصب في العراء خاصة تلك المحولات التي تستلم الفولتية من محطات التوليد مباشرة وترفعها وتربطها إلى خطوط النقل. هذه المحولات تسمى محولات القدرة Power Transformers وتكون كبيرة الحجم والسعات، أنظر الشكل 7-1. وسوف نتطرق في هذا الفصل إلى نظرية اشتغالها ودراسة أدائها. في البداية سوف نراجع نظرية إشتغال المحول ذي الملفين كونه أساساً لدراسة محولات القدرة متعددة الأطوار بصورة عامة.

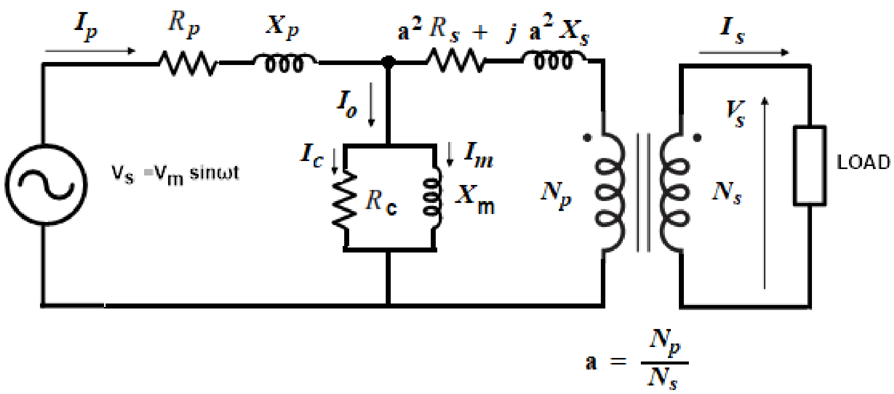
2-7 الدائرة المكافئة لمحول ذي ملفين

Equivalent Circuit of a Two-winding Transformer

إذا تم تسليط فولتية متوازنة ثلاثية الطور على أطراف محول ثلاثي الطور وكان الحمل عليه متوازناً فسوف تكون الظروف في كل طور من أطواره الثلاثة متشابهة عدا ما يتعلق بالإزاحة الطورية للفولتيات والتيارات على جهتي الإبتدائي والثانوي. يوضح الشكل 7-2 دائرة مكافئة لطور واحد فقط من المحول حيث نسبت ممانعة الملف الثانوي إلى الملف الإبتدائي. هذه الدائرة المكافئة تستخدم لتمثيل اشتغال محول مربوط بشكل نجمي- نجمي ثلاثي الطور في الحالة المستقرة.



الشكل 7-1 محول قدرة منصوب في محطة ثانوية.



الشكل 7-2 الدائرة المكافئة لطور واحد لمحول ثلاثي الطور.

في الشكل 7-2 نعرف الآتي:

$V_p =$ فولتية خط إلى المحايد، أي فولتية الطور مسلطة على ملف ابتدائى.

$V_s =$ فولتية خط إلى المحايد، أي فولتية الطورعند أطراف الثانوي.

$I_p =$ التيارالآتي من المصدرالمار في كل ملف طور للابتدائي.

$I_s =$ التيار في كل ملف طور للثانوي المار إلى دائرة الحمل.

I_o = تيار اللاحمل المارفي كل طور من الأبتدائي.

R_p = مقاومة الملف الابتدائي / الطور بالأوم.

X_p = المفاعلة التسربية للملف الابتدائي/ طور بالأوم.

R_s = مقاومة الملف الثانوي / طور بالأوم.

X_s = المفاعلة التسربية للملف الثانوي / طور بالأوم.

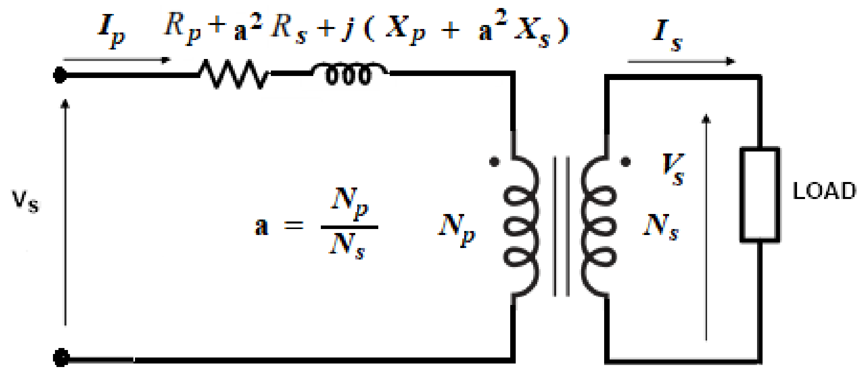
jX_m و R_c = ممانعة الأثارة المؤثرة التي يمر فها تيار اللاحمل I_o . التيار I_o له مركبيتان هما (أ) المركبة التي تنشئ الفيض المغناطيسي في القلب الحديدي I_m، (ب) المركبة التي تجهز القدرة المفقودة في الحديد المتسببة عن الفيض المتناوب I_c . هذه الدائرة يمكن تمثيلها بدائرة توالي $R_e + jX_e$.

N_p = عدد لفات الابتدائي.

N_s = عدد لفات الثانوي لفة طور.

في هذه الدائرة القياسية المكافئة، من الخلل اعتبار أن ممانعة دائرة الإثارة المغناطيسية (وهي الدائرة المسؤلة عن نشوء الفيض في أجزاء المحول ويعبر عنها بـ R_e+jX_e) عنصراً خطي الخواص، أي انها تكون ثابتة مثلما هي الحالة في ممانعة التوالي $R+jX$ للمحول وذلك لكون مركبة تيار الإثارة Excitation current (I_m) ومركبة تيار فقد اللب Core losses (I_c) يتغيران بصورة غيرخطية مع كثافة الفيض في اللب. على أية حال فان محول القدرة يشتغل في العادة بفولتية وتردد ثابتين تقريباً، لذا فإن ممانعة الإثارة تكون ثابتة تقريبا ضمن مدى الإشتغال الإعتيادي ويكون التيار الذي يأخذه المحول في حالة كونه غير محمل (تياراللالحمل) I_o صغير جدا إذا ماقورن بالتيار المقنن. ويشار إلى التيار المقنن في معظم الأحوال بوصفه مساويا إلى 1.0 بنسبة الوحدة ، عليه يتغير I_o مع نوع وحجم المحول ويكون عموما مابين 0.02 و 0.04 بنسبة الوحدة ، كذلك بما أن معظم طرق حسابات أنظمة القدرة تتعامل مع شبكة متعددة العناصر، لذا فكل محول فيها يمثل جهازاً واحداً من ضمن أجهزة عديدة فإنه من المقبول بصورة عامة إهمال التيار I_o بحيث يمكن حذف ممانعة الاثارة $R_e + jX_e$ من الدائرة المكافئة كما في الشكل 7-3، وفي مثل هذه الحالة نتمكن من تطبيق معادلات الخط القصيركافة المذكورة فى الفقرة 2-2 في الفصل الثاني. ومن الطبيعى سوف نجد بعض الحالات التي لايمكن عندها تطبيق مثل هذا الإفتراض ومن بينها دراسة تأثير التوفقيات وتيار المغنطة الأندفاعي، أو دائرة التتابع الصفري اللازمة في حسابات الأطوار الثلاثة غير

المتوازنة وكذلك في حالة نشوء الفولتيات المفرطة Over-voltages الناجمة عن عمليات الغلق والفتح Switching والتي تنشأ من قطع تيار عن محول ما وهو في حالة اللاحمل كما سيرد شرح هذه الأمور في الفقرات اللاحقة من هذا الفصل.



الشكل 7-3 الدائرة المكافئة التقريبية منسوبة للملف الإبتدائي لمحول ذي ملفين بعد إهمال دائرة الإثارة.

الآن إذا تم إهمال ممانعة دائرة الإثارة، عندئذ يمكن تمثيل المحول عند اشتغاله في حالة الاستقراربمقاومة توال R مع مفاعلة تسربية X ومحول مثالي. القيم الأومية المتمثلة بمقاومة التوالي والمفاعلة هذه يمكن أن تنسب إلى جهة الإبتدائي كما في الشكل 7-2 أو تنسب إلى جهة الثانوي وفي الحالة الإخيرة هذه فإن ممانعة مكافئة مقدارها:

$$\left[R_s + R_p\left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2\right] + j\left[X_s + X_p\left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2\right] \text{أوم}$$

توضع في دائرة الثانوي. أما جهة الإبتدائي فتكون بدون ممانعة. مما يجب ملاحظته انه لتحقيق ظروف تصميم كفوءة يجب ان تكون R_s مساوية تقريبا لـ $R_p(N_s/N_p)^2$ وكذ لك تكون X_s مساوية بالتقريب لـ $X_p(N_s/N_p)^2$. وتطبيق الظروف نفسها عندما تكون الممانعات منسوبة إلى الملف الإبتدائي.

من المفيد جداً استخدام قيم الممانعات معبراً عنها بنظام نسبة الوحدة وهذا هو الشائع حيث تكون المقاومة المكافئة بنسبة الوحدة عند القدرة المقننة MVA مساوية للمقدار الآتي:

$$\left[R_p + R_s\left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2\right] \times \frac{\text{تيار الطور المقنن للابتدائي}}{\text{تيار الطور المقنن للثانوي}}$$

وتحسب المفاعلة المكافئة بنسبة الوحدة بالإسلوب نفسه. من المعروف بنظام نسبة الوحدة انه لأي قدرة مختارة كأساس ومقدرة بالـMVA وعندما يشتغل المحول بفولتيتيه المقننتين المسلطتين على كلا جانبيه الأبتدائي والثانوي، توجد قيمة واحدة فقط للممانعة محسوبة بنسبة الوحدة. وإذا استخدمت كميات الثانوي فى المعادلة المذكورة في أعلاه فان القيم تكون نفسها بالضبط للمقاومة والمفاعلة إذا تم التعبير عنها بنسبة الوحدة. وتتراوح قيم ممانعة التوالي لمحول القدرة مابين 0.05 و 0.15 بنسبة الوحدة، وتأخذ جانب القيم العالية في الفولتيات والقدرات العالية. ومن جانب اخر تكون قيمة ممانعة دائرة الإثارة لتيار التتابع الموجب بحدود 25 بنسبة الوحدة في حالة المحول ذي المأخذ المتغيرVariable tap changer حيث يمكن لنسبة اللفات أن تتغير عن القيمة الإسمية وهي النسبة بين الفولتيتين الاسميتين المقننتين للنظامين المربوطين إليه (النظام المربوط إلى ملف الإبتدائي والنظام المربوط إلى ملف الثانوي). في هذه الحالة تظهر هناك نقطتان:

(أ) إن هذين النظامين قد يكونان مربوطين بمحولين (أوأكثر) لهما نسب تحويل مختلفة حيث يمكن التعامل مع هذه الحالة وذلك باسناد جميع الممانعات الأومية إلى مستوى فولتية واحد؛ ووضع محولات مثالية على التوالي مع تلك التي لها مآخذ تغييرغيرإسمية off-nominal taps وذلك للسماح للإختلاف بالفولتية.

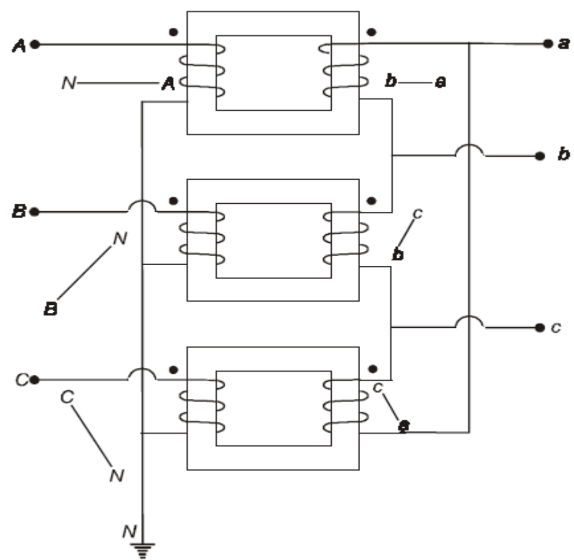
(ب) قد تتغير الممانعة مع تغيير موضع المأخذ مع إن الهدف الرئيسي في تصميم المآخذ المتغيرة هو جعل هذا التغيير أقل ما يمكن.

إذا كان ربط أحد ملفات هذه المحولات مثلثي الشكل فإن الممانعات الأومية تبقى منسوبة إلى الملف الآخر وذلك بضربها بمربع نسبة اللفات لكل طور. وإذا نسبت الممانعات بهذه الطريقة من الملفات نجمية الربط إلى الملفات المربوطة بشكل مثلثي فتربط هذه الممانعات وتلك التي للملف الأخيرعلى شكل ربط مثلثي والممانعات المتساوية هذه Z والمربوطة بشكل مثلثي يمكن بعد ذلك تغييرها بممانعات مكافئة مقدار كل منها $Z/3$ مربوطة بشكل نجمي وذلك باستخدام تحويل الربط المثلثي إلى نجمي المعروف، راجع الملحق-2 في نهاية الكتاب، عندئذ يمكن أن نأخذ ملفاً نجمي الربط بالممانعات الجديدة ليعطينا فولتية وتيار الخط نفسيهما. لكن إذا تم التعبيرعن الممانعات بنظام نسبة الوحدة حينئذ تكون الكميات هذه غير معتمدة على أسلوب الربط إن كان مثلثيا أو نجمياً. ولا تشكل طريقة ربط ملفات المحولات أية مشكلة عند احتساب تيارات النظام إلا إذا كانت هناك حاجة لإيجاد التيارات الفعلية ضمن أطوار المحول نفسه.

3-7 انواع المحولات الثلاثية الطور ذات الملفين

3-phase Two-winding Transformer Type

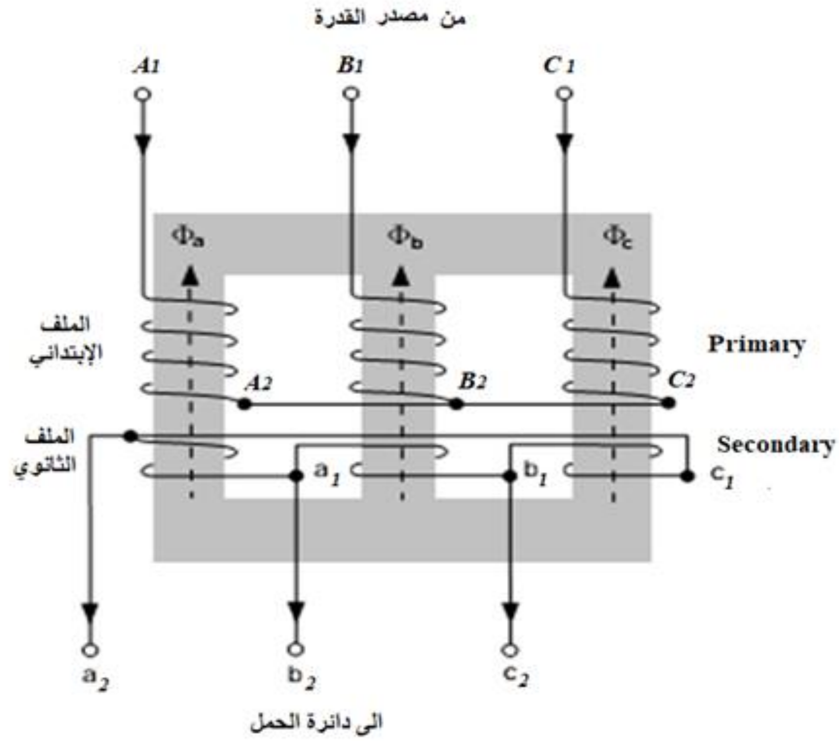
يتم تصنيع المحولات الثلاثية الطور إما من ثلاثة محولات أحادية الطور يطلق عليها مجموعة محولات أو خازن محولات Transformer Bank كما في الشكل 7-4 ، أوتكون من نوع اللب الثلاثي الأفرع Three-core Transformer كما في الشكل 7-5.



الشكل 7-4 محول ثلاثي الطور يتألف من ثلاث محولات أحادية الطور يطلق عليه خازن محولات Transformer Bank.

والمحول ذو اللب الثلاثي الأفرع Three-core Transformer يقلل من وزن وحجم الوحدات الأساسية لتسهيل عملية النقل، لكنه يكون أقل كفاءة وأكثر كلفة من الناحية الاقتصادية ، عدا مسألة كلفة تجهيز المواد الاحتياطية للوحدة الواحدة حيث تعد أقل إذا كان المحول ذا طور واحد .

الشكل 7-5 يبين ترتيباً لمحول ذي لب (قلب حديد) بثلاثة أفرع وبملفات مربوطة على شكل نجمي مثلثي. هذا الشكل هو تخطيطي بحت أي أنه يبين ملفات الابتدائي والثانوي جنبا إلى جنب على الفرع الواحد. وهذا الترتيب قد يعطي مفاعلة تسربية عالية. وتصنع بعض المحولات أيضاً بخمسة أفرع وذلك للحصول على ارتفاع أقل عندما يكون هذا مطلوبا كأن تكون المحولات كبيرة جدا مثل محول سعة 600-MVA بفولتية 400 كيلو فولت ، أنظر الشكل 7-6.



الشكل 7-5 شكل تخطيطي لمحول ذو لب بثلاثة أفرع بملفات مربوطة على شكل نجمي- مثلثي.



الشكل 7-6 محول ثلاثي الطور بخمسة أفرع من النوع الشباكي Shell type.

في الرسم الذي في الشكل 7-5 تم تبني الاصطلاحات التالية في بيان الربط والمخططات الطورية للمحولات (طبقا لنظام الربط القياسي الدولي IEC) وكالآتي :

الحروف الطباعية الكبيرة Capital letters تشير إلى ملف الفولتية العالية .H.V:

D = delta مثلثي

Y = star نجمي

Z = interconnected-star (or zigzag) نجمي متخالف أو متعرج

N = neutral connection brought out to a terminal نقطة المحايد إذا كانت ظاهرة

- الحروف الطباعية الصغيرة Lower –case letters تشير إلى ملف الفولتية المنخفضة أو الملف الثالثي Tertiary .

d = delta مثلثي

y = star نجمي

z = interconnected-star (or zigzag) نجمي متخالف

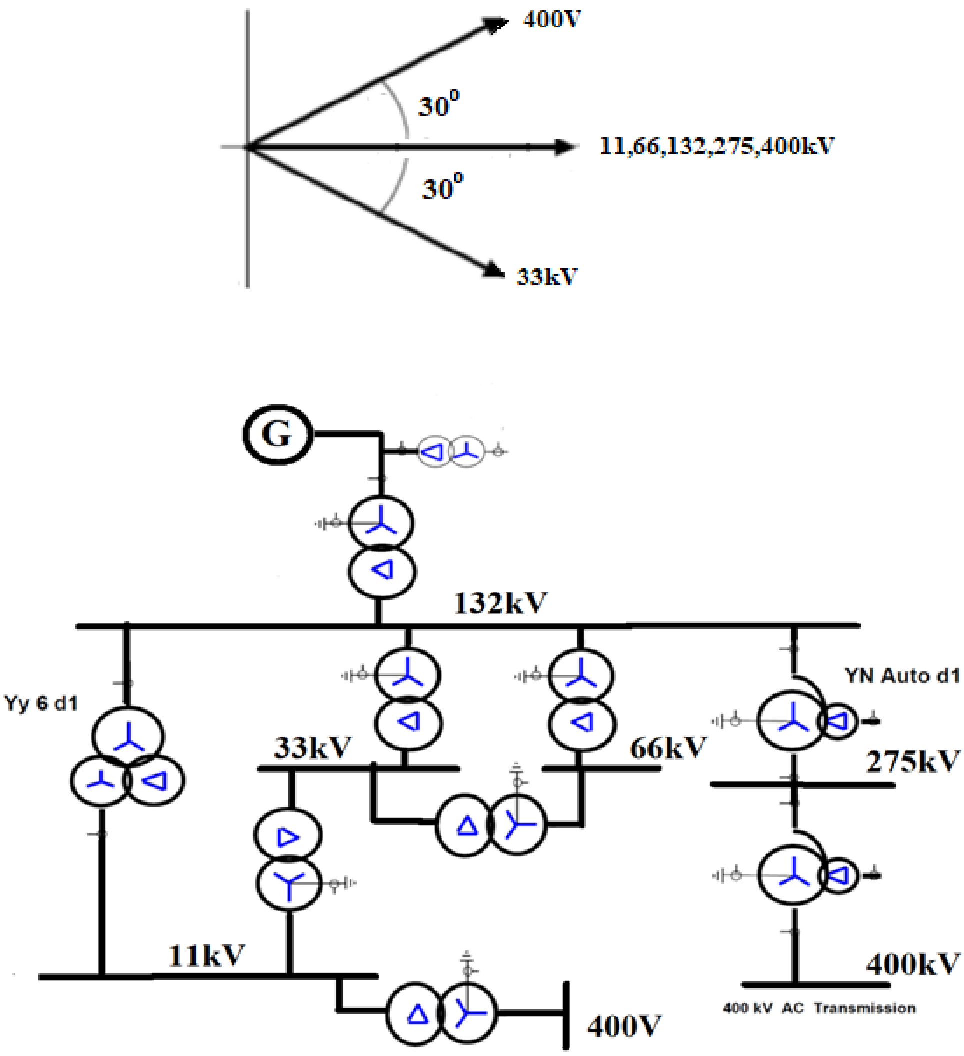
n = neutral connection brought out to a terminal نقطة المحايد إذا كانت ظاهرة

أما اتجاه القطبية فيكون بحيث أن القوة الدافعة الكهربائية (ق. د. ك) تكون لحظية وفي الطور نفسه بين الأطراف مع تأشيراتها المناظرة. أي أنه في اللحظة التي يكون فيها فرق الجهد لـ A_1 بالنسبة الى A_2 عند قيمته القصوى الموجبة يكون فرق الجهد لـ a_1 بالنسة إلى a_2 عند القيمة القصوى الموجبة أيضاً.

4-7 إزاحة زاوية الطور خلال المحول

إذا ربطت كل من ملفات الإبتدائي والثانوي بالطريقة نفسها. أما بشكل نجمي أو مثلثي وتم توصيل أطراف الملفات المتناظرة (المتشابهه) عندئذ سوف لاتكون هناك أية ازاحة في الطور بين الفولتيات المتناظرة لأي طور إلى المحايد على أي من جهتي المحلول (مع أنه قد يحدث فرق طور مقداره°180 . فيما لو ربطت الاطراف A_1 و B_1 و C_1 مثلا لتشكيل نقطة تفرع نجمي على جهة الإبتدائي وربطت كذلك

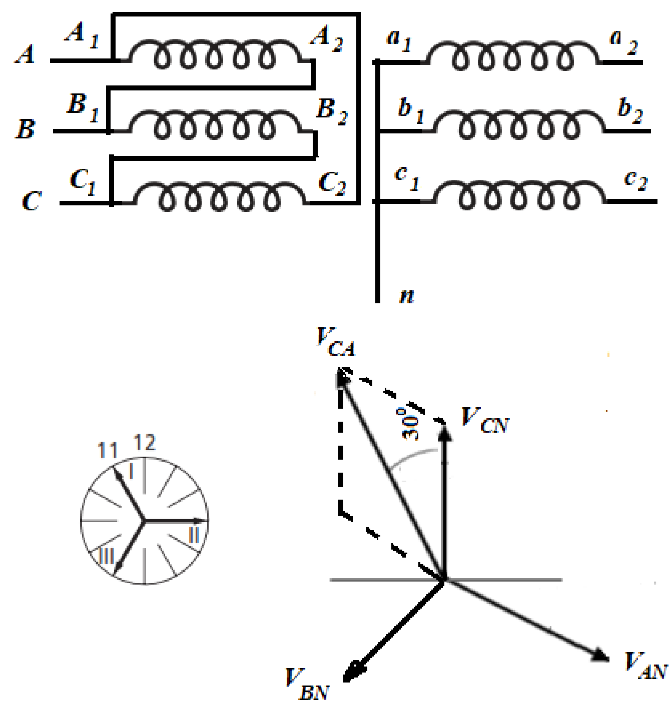
a_2 و b_2 و c_2 على جهة الثانوي). عليه توجد محولات مختلفة لها ربط بأشكال مختلفة في الشبكات الكبرى التابعة لهيئاة التوليد والطاقة الكهربائية والمؤسسات التابعة لها وكما موضح في الشكل 7-7.



الشكل 7-7 ربط محولات القدرة في الشبكة الكهربائية النموذجية.

وتستخدم الأعداد من صفر إلى 11 التي تناظر أعداد عقارب الساعة حيث يستخدم الرقم صفر(بدلا من العدد 12) للدلالة على زاوية فرق الطور التي تحدث بالفولتية أثناء عملية التحويل. ومن الأنواع الشائعة لمحولات القدرة هو المحول ذي الربط المشار إليه بالحروف Dyn 11، التي تعني أن ملف الفولتية العالية الإبتدائي مربوط بشكل مثلثي D (Delta)، وملف الفولتية المنخفضة الثانوي مربوط بشكل نجمي Y(Star).

أما فرق الطور الحاصل خلال عملية التحويل فهو +30 درجة وهذا يعني أنه عندما تكون فولتية الإبتدائي للطور الأول منطبقة على الساعة 12 تكون فولتية الثانوي للطور نفسه منطبقة على الساعة 11 كما موضحة في الشكل7-8. ولتوضيح ذلك ففي حالة الربط بنظام Dy11 المبين في الشكل 7-8 تصبح الفولتية عبر ملف الطور للثانوي $V_{CA} = V_{CN} - V_{AN}$ وتنتج هناك إزاحة طورية مقدارها °30 متقدمة بين فولتيات الأطوار على جهة الثانوي وفولتيات الأطوار المناظرة لها على جهة الإبتدائي.

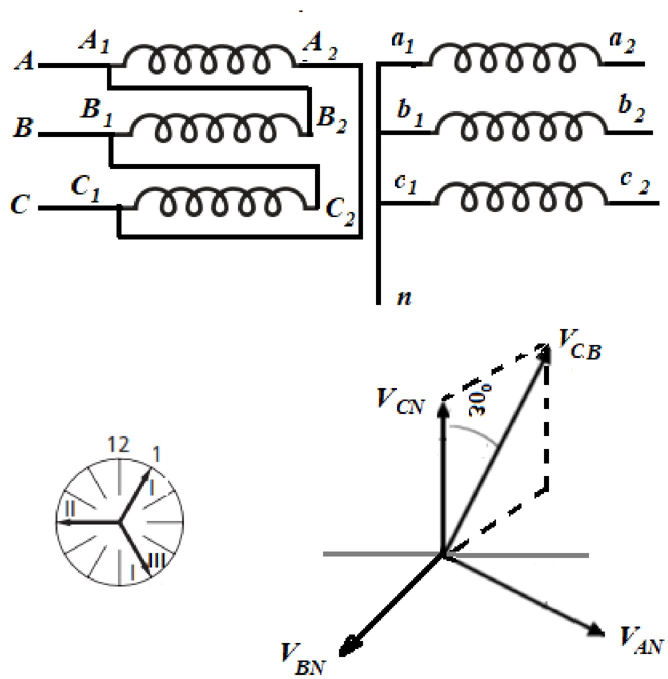


الشكل 7-8 ربط Dy11 مثلثي – نجمي.

لأغراض تقليل التوافقيات التي سيتم مناقشتها لاحقاً، يكون الربط المثلثي مفضلا في كثير من محولات القدرة. وقد يستعمل ملف ثالث (يسمى بالثالثي) في بعض محولات القدرة ذات الحجوم الكبيرة فقط والتي يمكن أن تربط بشكل مثلثي.

أما في حالة الربط Dy 1 المبين في الشكل 7-9 تكون الفولتية عبر ملف الطور, C للابتدائي هي $V_{CB} = V_{CN} + V_{NB} = V_{CN} - V_{BN}$. وهذه الفولتية تكون في الطور نفسه مع الفولتية V_{cn} عبر الطور c للثانوي وذلك لأن هذين الملفين يكونان مربوطين على الفرع نفسه ويشبكهما الفيض نفسه. عليه فان الفولتية

الأخيرة V_{cn} تتأخر بزاوية $30°$ خلف فولتية الطور المناظرة V_{CN} على جهة الابتدائي. ونقطة المحايد N يمكن أن تكون ظاهرة أوغير ظاهرة فيزياوياً فإذا كانت ظاهرة عندئذ تكون عند نقطة التفرع النجمي لمولد تزامني مربوط بشكل نجمي أو ثانوي محول يجهز محول مربوط بشكل مثلثي- نجمي. أو قد يتم الحصول عليها بواسطة محول تأريض متعرج الربط Zig – Zag .



الشكل 7-9 ربط مثلني - نجمي Dy 1

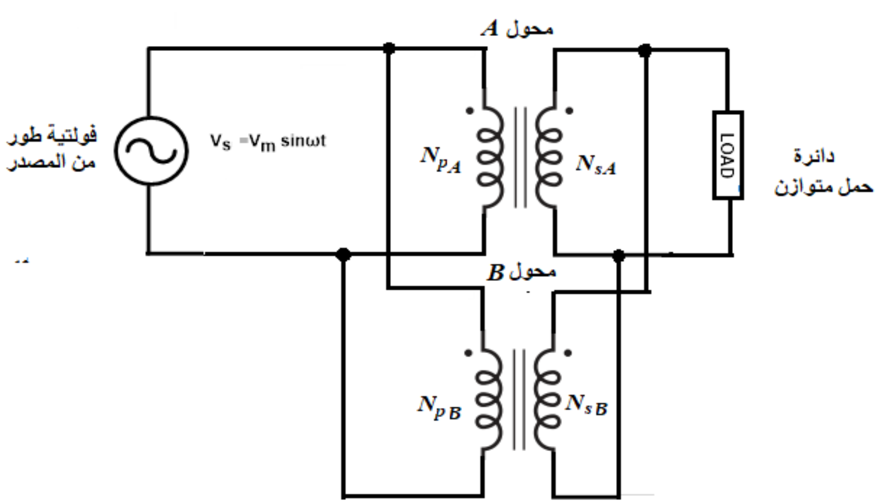
في ضوء تفسير حدوث الإزاحة الطورية في المحولات ضمن الشبكة الكبرى فمن الشكل 7-7 يمكن بيان عدم وجود فرق طور بين منظومة 400 كيلو فولت ومنظومة 11 كيلو فولت ولكن منظومة الفولتية المنخفضة 415 فولت لها أطوار فولتية تسبق تلك التي لمنظومة 11 كيلو فولت بزاوية مقدارها $30°$. وبسبب ظهور فرق طور مقداره $30°$ بين قضبان 132 كيلو فولت و 33 كيلو فولت فإن محولات 33/11 كيلو فولت يجب أن تعطي إزاحة خلفية مقدارها $30°$. والسبب في ظهور إزاحة $30°$ أمامية أوخلفية في محول مثلثي- نجمي أو نجمي - مثلثي فقد تم بيان ذلك في الشكلين 7-8 و7-9.

5-7 اشتغال المحولات الثلاثية الطورعلى التوازي

الغرض من ربط محولات القدرة واشتغالها على التوازي هو لزيادة نقل الطاقة من خلال خطوط النقل المرتبطة بها. فالقدرات العالية التي لايمكن لمحول واحد استيعابها وضخها إلى الخطوط تتطلب تشغيل أكثر من محول على التوازي بدل من استخدام محول واحد كبير جداً. هذه الطريقة لها محاسن كثيرة، إذ أن استخدام محول واحد بحجم كبير له مساوئ متعددة:

- صعوبة النقل من المصنع ألى مواقع النصب لكبر حجمه ووزنه الثقيل وعدم تيسر الطرق والجسور الملائمة لنقله في كثير من المناطق.
- في حالة عطل المحول أو خروجه لعملية الصيانة سوف يؤدي إلى إنقطاع تجهيز الطاقة عن عدد كبير من المستهلكين.
- في حالة استخدام أكثر من محول تعمل على التوازي تكون الوثوقية في تجهيز الطاقة للمستهلكين أفضل.
- يمكن اجراء الصيانة الدورية لمحولات متعددة بصورة سلسة بدون التأثير الكبير على استمرارية تجهيز الطاقة للمستهلكين.

ويوضح الشكل 7-10 أسلوب ربط محولين أحاديا الطور على التوازي.



الشكل 7-10 محولان أحاديا الطور مربوطان على التوازي.

أما ربط المحولات الثلاثية الطور فلا تختلف عن تلك التي أحادية الطور، إذ تخضع الأخيرة لتتوفر الشروط التالية:

(أ) يجب ان تكون المحولات جميعها من عائلة واحدة فيما يخص الإزاحة الطورية، أي أن جميع الأطوار المربوطة على شكل نجمي يربط بعضها مع البعض على التناظر لتشكيل نقطة محايد مشتركة. عليه فإن جميع الأطراف يجب أن تُعَلَّم بصورة صحيحة وتربط إلى بعضها بصورة ملائمة وهذا الشرط يعد اساسياً ومطلقاً.

(ب) يجب أن تمتلك المحولات جميعها نسبة تحويل الفولتية نفسها. وإذا اختلفت الـ ق. د. ك للثانوي يؤدي ذلك لمرور تيار دوار بين المحولات نفسها ، ولما كانت الملفات لها ممانعة منخفضة فإنه يسمح باختلاف ضئيل جدا فقط بنسب الفولتية بحيث لايؤديِ ذلك إلى مرور تيار دوار له تأثير كبير مضر على هذه الملفات.

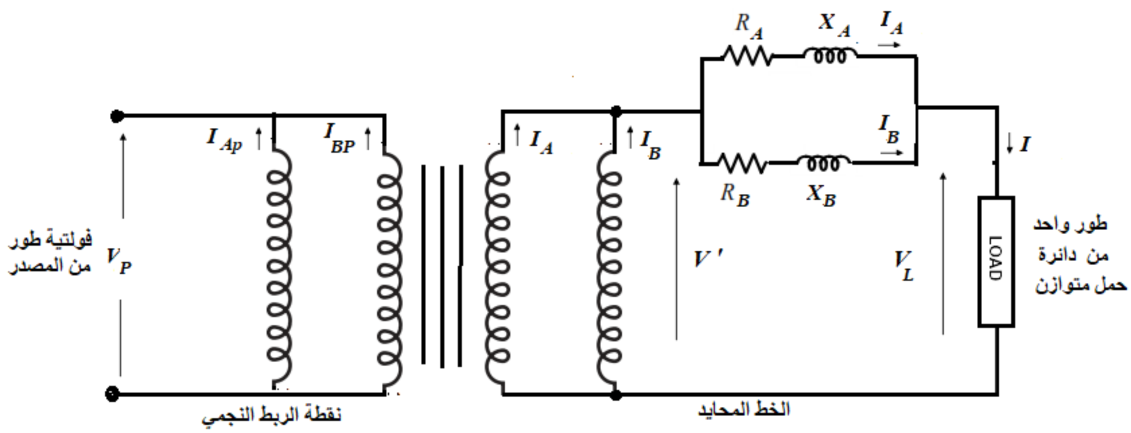
(جـ) جميع ممانعات المحولات المحسوبة بنسبة الوحدة والمعبرعنها بتقنين الحمل الكلي للمحولات نفسها والمقدَر بالميكافولت أمبيرMVA يجب أن تكون متساوية. (بتعبيرآخر عن هذا الشرط أن ممانعات المحولات الأومية يجب أن تتناسب عكسياً مع القدرة المقننة MVA عند الحمل الكلي أو التام). وسوف يلاحظ لاحقاً أن هذا الشرط يجب أن يتحقق فيما لوتطلب الأمراقتسام الحمل بين المحولات بصورة تتناسب مع قدراتها المقننة، وبذلك تستطيع هذه المحولات تجهيز حمل كلي مساوٍ لقدراتها المقننة نفسها.

(د) يجب أن تكون النسبة X/R (مفاعلة التسرب إلى المقاومة للملفين معاً) متساوية للمحولات جميعهاً. وهذا الشرط يحقق عامل قدرة متساوٍ للمحولات كافة ويعطي أداء اقتصادي جيد. وسبب ذلك هو تقليل التيارات الدوارة في المحولات إلى أدنى ما يمكن لحمل كلي تام معين؛ وبالتالي تستطيع المحولات تجهيز حمل أكبر بدون تجاوز تقنينات قدراتها الأنفرادية (MVA) .

1-5-7 إشتغال المحولات على التوازي بنسب تحويل متساوية EQUAL RATIOS

عندما يربط محولين A و B لهما نسب لفات متساوية على التوازي يغذيان حملاً ثلاثي الطور متوازناً فعندما تنسب ممانعة الإبتدائي إلى الثانوي وتضاف إلى ممانعة الثانوي نفسه تعطي ممانعة كلية مقدارها $Z_A = R_A + j\,X_A$ أوم وكذلك $Z_B = R_B + j\,X_B$ أوم لكل من المحولين على التعاقب وكما مبين في الشكل 7-11. وتجدر الإشارة إلى أن الممانعات المبينة في الشكل 7-11 المذكوروالموضحة بالحروف الكبيرة Z رغم أنها لاتتغير لحظياً على شكل جيبي مع الزمن كما تفعل المطاورات، إلا أنها كميات مركبة لها حدان أحدهما حقيقي والآخر تخيلي $Z = R + j\,X$ ، أي أن لها مقدار قيمته Z وزاوية قيمتها θ حيث يكون مقدارها يساوي $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ و زاويتها $\theta = tan^{-1}\,X/R$ كما تم توضيح ذلك في الفصل

الأول من هذا الكتاب. ومن الضروري أستخدام الصيغة المركبة للمانعة Z وليس مقدارها Z أو مقدارها المطلق| Z | فقط. ويعد هذا المفهوم صحيحاً وعملياً فيما يخص حسابات أنظمة القدرة كافة.



الشكل 7-11 محولات مربوطة على التوازي.

في الشكل 7-11 تم رسم محول نجمي - نجمي للتبسيط ، ويمكن إبدال الملفات المربوطة بشكل نجمي بمكافئاتها من الملفات المربوطة بشكل مثلثي مع الأخذ بعين الإعتبارأن التيار المار في طور واحد من الحمل يعبرعنه كالآتي:

$$I = I_A + I_B \tag{7.1}$$

وتكون فولتية الممانعات متساوية بحيث

$$I_A Z_A = I_B . Z_B \tag{7.2}$$

والمعادلتان (7.1) و (7.2) تعطيان

$$I_A = I . \frac{Z_B}{Z_A + Z_B} \tag{7.3}$$

$$I_B = I . \frac{Z_A}{Z_A + Z_B} \tag{7.4}$$

وإذا قام كل من المحولين A وB بتجهيز قدرتين P_A و P_B بالواط على التعاقب وقدرتين متفاعلتين متاخرتين Q_B و Q_A ، عليه فإن:

$$P_A + jQ_A = 3VI_A^*$$

$$P_B + j\ Q_B = 3VI_B^*$$

حيث أن V هي فولتية الطور الطرفية عبر الحمل وأن I_A^* و I_B^* هما مترافقا التيارين I_A و I_B . ومن المعادلة (7.3) وكذلك (7.4) نحصل على

$$P_A + J\ Q_A = (P + JQ).(\frac{Z_B}{Z_A + Z_B})^* \qquad (7.5)$$

وكذلك

$$P_B + J\ Q_B = (P + JQ).(\frac{Z_A}{Z_A + Z_B})^* \qquad (7.6)$$

حيث أن $(P + j\ \ Q) = 3VI^*$ هي الحمل الكلي الذي يجهزه المحولان كليهما.

وبقسمة (7.3) على (7.6) ينتج

$$\frac{P_A + j\ Q_A}{P_B + j\ Q_B} = (\frac{Z_B}{Z_A})^* \qquad (7.7)$$

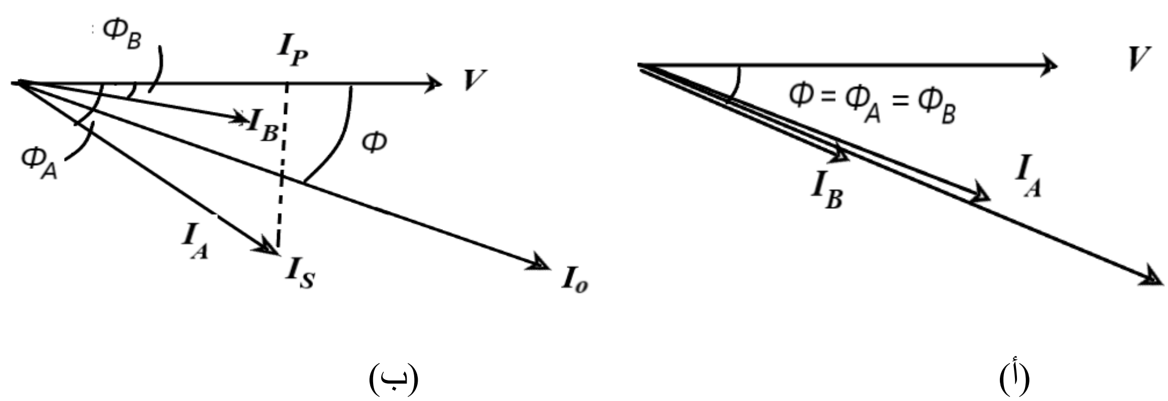
لكي يكون بالأستطاعة تجهيز أقصى حمل ممكن بالفولت أمبير، يجب أن يقتسم المحولان الحمل الكلي بما يتناسب وتقنين كل منهما. فمثلاً أفرض أن حملاً لمصنع تزايد بحيث أن محول A قدرته 1000 kVA موجود أصلاً ويراد تقويته بربط محول B قدرته 200 kVA على التوازي معه، فإذا كانت $Z_B/Z_A = 4$ بدلاً من النسبة الصحيحة وهي 5 فأن (7.5) تبين أن المحول الجديد سوف يأخذ 1/5 خمس الحمل الكلي بحيث إذا كان الحمل 1000 kVA فأن المحول الجديد سيكون محملاً كلياً. لذا ينبغى ألا تحصل أية زيادة في الحمل على الإطلاق بعد نصب المحول الجديد. وهذا يشير إلى أن ما قد يظهر من أختلاف بسيط ونسبي للنسبة الصحيحة للممانعة قد يكون خطره جسيماً. عليه ينبغي للنسبة بين الأحمال يجب أن تكون أيضاً هي مساوية لنسبة التقنينات وأن تعطى من (7.7).

$$\frac{|P_A + jQ_A|}{|p_b + jQ_b|} = \frac{Z_B}{Z_A} = \frac{\text{تقنين الحمل الكلي للمحول } A}{\text{تقنين الحمل الكلي للمحول } B} = \frac{3VI_A'}{3VI_B'} \qquad (7.8)$$

حيث أن $I_A^{\prime}$ و $I_B^{\prime}$ هما التياران المقننان أو تيارا الحمل الكلي على جهة الثانوي.

وتبين المعادلة (7.8) أن الممانعات الأومية يجب أن تتناسب عكسياً مع تقنينات المحولات. على أية حال، من المفيد جداً أستعمال الممانعات معبراً عنها بنسبة الوحدة في معظم الحالات. فممانعة المحول A بنسبة الوحدة عند تقنينه بالفولت أمبير هي $I_A^{\prime} Z_A/V$ وتلك التي للمحول B عند تقنينه هي $I_B^{\prime} Z_B/V$. ومن الطبيعي ملاحظة أن الممانعات بنسبة الوحدة هذه تكون كميات مركبة أي بالضبط تكون في صيغة الممانعات الأومية نفسها. ومن تعاريف الممانعات هذه بنسبة الوحدة تبين المعادلة (7.8) أن المحولات يجب أن تمتلك ممانعات بنسبة الوحدة متساوية بالمقدار (وكل منهما تكون مسندة إلى تقنينها الخاص بها).

يبين الشكل 7-12 (أ) أنه إذا أشتغل المحولان بعاملي قدرة في الثانوي مساويين لعامل قدرة الحمل $\cos \emptyset$ ، عليه فعند تجهيز حمل كلي معين يكون التيارالمارخلالهما أصغر منه فيما لو أشتغل هذان المحولان بعاملي قدرة مختلفين $\cos \emptyset_A$ و $\cos \emptyset_B$. لذلك فإذا كان عاملا القدرة للمحولين متساويين عندئذ يستطيع هذان المحولان تجهيز حمل كلي أكبربدون تجاوز تقنيناتهما.



الشكل 7-12 : المخطط الطوري للثانوي: (أ) لعوامل قدرة متساوية ، (ب) لعرامل قدرة غيرمتساوية.

من الشكل 7-12 (ب) تكون القد رة المزودة للحمل كالاتي:

$$P_A = 3VI_P$$

$$Q_A = 3VI_P$$

كذلك

$$\tan \emptyset_A = \frac{I_q}{I_p} = \frac{Q_A}{P_A} \tag{7.9}$$

ويمكن كتابة $\tan \emptyset_B$ بتعبير مشابه لما ورد في أعلاه، ولعوامل قدرة متساوية تكون

$$\frac{Q_A}{P_A} = \frac{Q_B}{P_B}$$

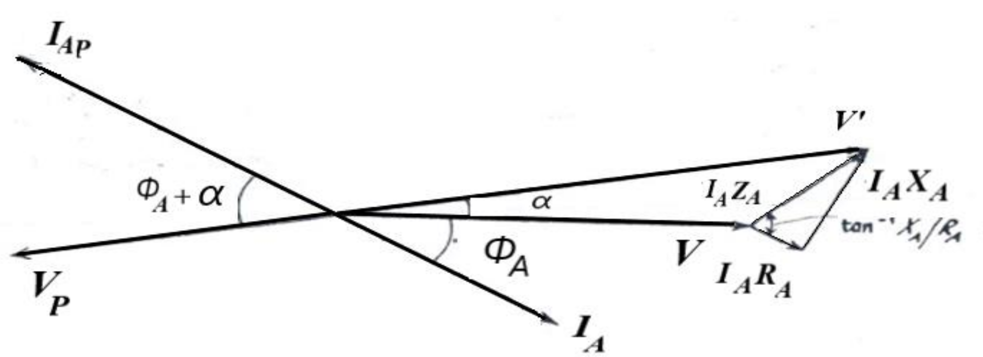
والنسب المعطاة بالمعادلة (7.7).

$$\frac{P_A + j\,Q_A}{P_B + j\,Q_B} = (\frac{Z_B}{Z_A})^*$$

يجب أن تكون " حقيقية " وهذا يتحقق إذا كانت

$$\frac{X_A}{R_A} = \frac{X_B}{R_B} \qquad (7.10)$$

مما يجب ملاحظته هو أن عامل القدرة للحمل $\cos \emptyset$ الذي هو جيب تمام الزاوية المحصورة بين تيار طور المارفي الثانوي وفولتية الطور في الثانوي نفسه عبر الحمل لايكون هونفسه عامل القدرة في الإبتدائي؛ أي لايساوي جيب تمام الزاوية المحصورة بين التيارالمار في الإبتدائي وفولتية الطور في الإبتدائي، والسبب في ذلك هو تأثير فولتية ممانعة المحول. ويمكن معاينة ذلك من المخطط الطوري المبين فى الشكل7-13 الذي يمثل ظروف المحول الذي في الشكل 7-11 حيث يكون هنا عامل القدرة لإبتدائي المحول A هو $\cos(\emptyset_A + \alpha)$. وإذا تحقق الشرطان في المعادلتين (7.8) و (7.10) فأن I_A و I_B سوف يكونان في الطور نفسه وبذلك يتساوى عاملا القدرة لإبتدائي المحولين A و B ويتساوى أيضاً عاملا القدرة لثانوييهما.



الشكل7-13 المخطط الطوري لمحول واحد.

مثال محلول 7-1

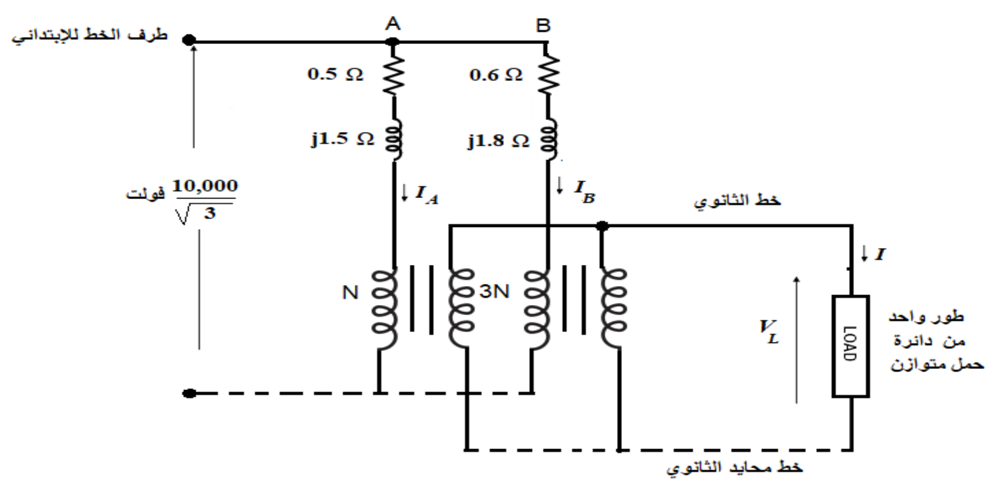
محولان A و B ثلاثيا الطور لهما نسب تحويل متساوية، كل منهما مربوط على شكل نجمي في جهتي الإبتدائي والثانوي لكليهما. تم تشغيل المحولين على التوازي لتجهيز حمل معين بحيث كان تيار الإبتدائي للمحول A هو 100 أمبير وعامل القدرة على جهة الإبتدائي هو 0.7 متأخر. إحسب عامل القدرة والتيار الإبتدائي للمحول B. وإحسب أيضا عامل قدرة الحمل وتيار الحمل الكلي علماً أن كلا المحولين يمتلك عدداً من اللفات لكل طور في الثانوي مساوية لثلاثة أضعاف تلك التي في الإبتدائي. قيم المقاومات والمفاعلات التسربية لكل طور لكلا المحولين منسوبة إلى جهة الإبتدائي هي:

$R_A = 0.5$ أوم $X_A = 1.5$ أوم $R_B = 0.6$ أوم

وكذلك $X_B = 1.8$ أوم .

إذا كانت فولتية الخط للإبتدائي هي 10 كيلو فولت ، إحسب المقاومة والمفاعلة لكل طور لحمل مفرد مربوط بشكل نجمي والذي يكون مكافئا للحمل الحقيقي. وإذا ربطت مفاعلة Reactanceحثية مقدارها 0.5 أوم ذات مقاومة مهملة إلى المحول A وذلك بين كل طرف من الإبتدائي ونقطة المصدر فاحسب قيمة تيار الإبتدائي الجديدة وكذلك عامل قدرته إذا لم تتغير ممانعة الحمل.

الحل: يوضح الشكل 7-14 مخططاً لطور واحد من المحولين وكذلك الحمل. وإذا نسب الحمل إلى الإبتدائي عندئذ يمكن رسم الدائرة المكافئة الناتجة كما في الشكل 7-15 مع ابتدائي بدون ممانعة وبحذف ملفات الثانوي.



الشكل 7-14 .

تيار الإبتدائي للمحول A

$$I_A = 100 \times 0.7 - j\,100\sqrt{1-0.7^2} = 70 - j\,71.2A$$

حيث أن المطاور المرجع هو الفولتية المسلطة على طور الإبتدائي المناظر والذي هو

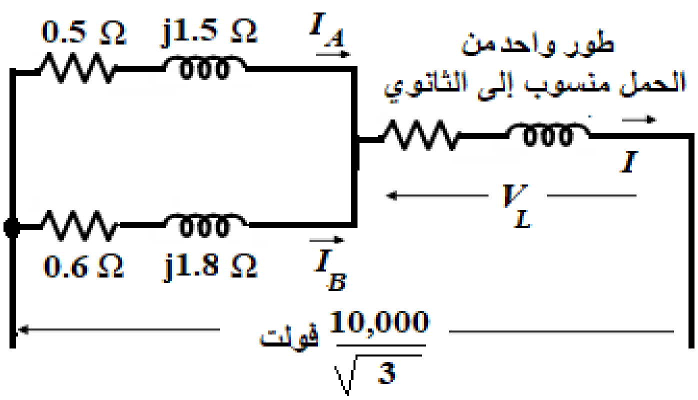
$(10\,000/\sqrt{3})\angle 0^\circ$ فولت.

وبمساواة هبوط الفولتيات عبر ممانعات المحولين

$$(70 - j\,71.2)(0.5 + j\,1.5) = I_B(0.6 + j\,1.8)$$

$$I_B = \frac{5}{6}(70 - j\,71.2) = 58.3 - j\,59.3 \quad \text{أمبير}$$

$$I_B = \left(\sqrt{58.3^2 + 59.3^2}\right) = 83 \quad \text{أمبير}$$



الشكل 7-15 .

عامل قدرة إبتدائي المحول B يكون 0.7 وذلك لأن $X_A/R_A = X_B/R_B$

بما ان عاملي القدرة متساويان، عليه يكون التياران I_A و I_B في الطور نفسه بحيث أنه يمكن جمع الإثنان جمعاً جبرياً مباشراً وكالآتي:

$$I = I_A + I_B = 183\ A$$

وهذا هو تيار الحمل منسوبا إلى الإبتدائي بحيث أن التيار الحقيقي في الحمل هو 183÷3 ويساوي 61 أمبير.

إن عامل قدرة الحمل هوجيب تمام الزاوية المحصورة بين الـتيار 61 أمبير والفولتية V_2 أو بين التيار 183 أمبير والففولتية $V_2/3$. والفولتية الأخيرة هذه هي التي تكون عبر طور واحد من الحمل عندما تنسب إلى الإبتدائي حيث يمكن إيجادها كما يأتي:

$$\frac{V_2}{3} = \frac{10000}{\sqrt{3}} - I_A Z_A = 5780 - (70 - j\ 71.2)(0.5 + j\ 1.5)$$

$$= 5638 - j\ 69 \text{ فولت}$$

والفولتية $\frac{V_2}{3}$ تتاخر عن فولتية الخط الرئيسية $\frac{10\ 000}{\sqrt{3}}$ بزاوية مقدارها

$$tan^{-1}\frac{69}{5638} = 0^\circ\ \ 42'$$

والتيار 183 أمبير يتاخر عن الفولتية $\frac{10\ 000}{\sqrt{3}}$ بزاوية

$$cos^{-1}0.7 = 45^\circ\ \ 36'$$

والتيار 183 أمبير يتأخر عن $\frac{V_2}{3}$ بزاوية تساوي $44^\circ\ \ 54'$

عليه يكون عامل قدرة الحمل = $\cos 44^\circ\ 54'$ متاخر

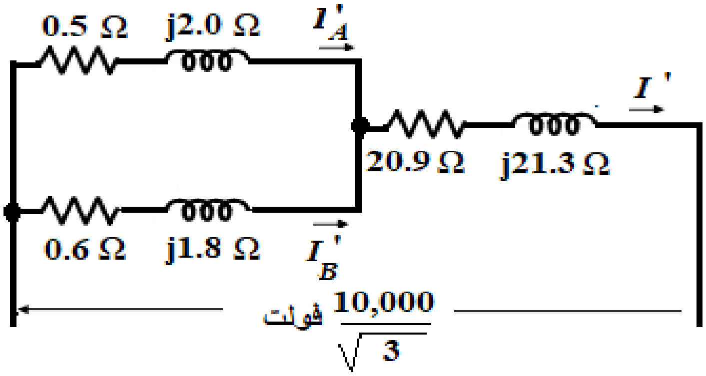
ممانعة الحمل منسوبة إلى الإبتدائي

$$\text{ممانعة الحمل} = \frac{5638 - j\ 69}{183(0.7 - j\ 0.712)}\Omega = 20.9 + j\ 21.3\Omega$$

وكل طور من الحمل المكافيء المربوط بشكل نجم عند طرف الثانوي يكون على هذا الأساس

$$9(20.9 + j\ 21.3)\Omega = 188.1 + j\ 191.7\Omega$$

عندما تربط مفاعلة حثية قيمتها $j\ 0.5\ \Omega$ أوم على التوالي مع كل طور إبتدائي للمحول A تصبح الدائرة المكافئة كما مبينة في الشكل 7-16.



الشكل 7-16.

وممانعة الدخل الكلية في الإبتدائي لكل طور هي

$$= 20.9 + j\,21.3 + \frac{(0.5 + j\,2)(0.6 + j\,1.8)}{1.1 + j\,3.8}\Omega = 21.24 + j\,22.25\ \Omega$$

$$I' = \frac{10\,000}{\sqrt{3}(21.2 + j\,22.25)} = 187.8\underline{/-46^\circ\,20'}A$$

$$I_A' = (129.7 - j\,135.7)\frac{(0.6 + j\,1.8)}{(1.1 + j\,3.8)} = 59.4 - j\,67.4\ A$$

$$I_A' = 89.7\ A$$

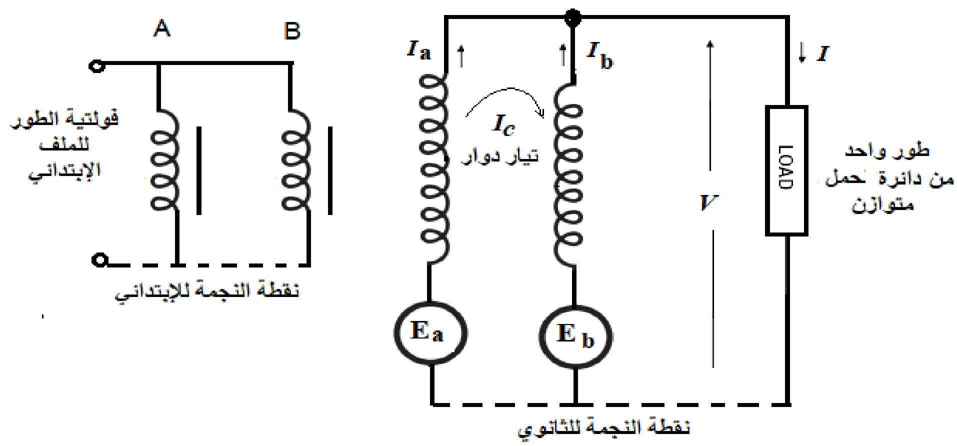
وعامل القدرة للمحول A يكون

$$\cos\left(tan^{-1}\frac{67.4}{59.4}\right) = 0.661 \quad \text{متأخر}$$

2-5-7 إشتغال المحولات على التوازي بنسب تحويل غير متساوية UNEQUAL RATIOS

إذا كان للمحولين a و b نسب لفات مختلفة جزئياً بحيث أنه في الدائرة المكافئة وعندما تنسب جميع قيم الممانعات إلى الثانوي تكون القوى الدافعة الكهربائية المحتثة في الملفات الثانوية هي E_a و E_b.

وبفرض أن $E_a > E_b$. فأن تياراً دواراً موضعياً سوف يجري في ملفات المحولين وكما مبين في الشكل 7-17. التيار الدوار هذا سيكون معتمدا على قيمة الممانعة لكلا المحولين وكالآتي: $I_c = \frac{E_a - E_b}{Z_a + Z_b}$



الشكل 7-17 محولان بنسب لفات غير متساوية مربوطان على التوازي.

وإذا أسهم المحولان بتيارين I'_a و I'_b ضمن تيار الحمل الكلي I فالتيارات الحقيقية في المحول

تكون $I_a = (I'_a + I_I)$ و $I_b = (I'_b - I_I)$

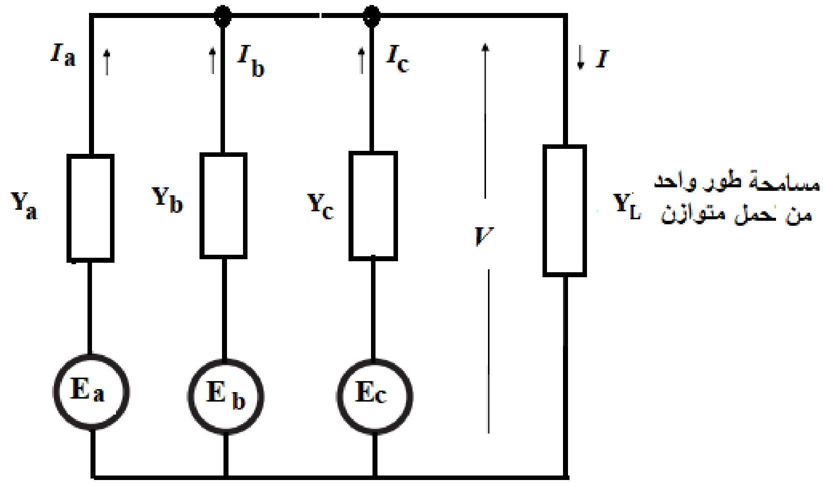
أما المعادلة (7.1) فمازالت ممكنة التطبيق حيث ان $I_a + I_b = I$ ولكن المعادلة (7.2) لايمكن أن تطبق في هذه الحالة ، وعليه يستعاض عنها بـالمعادلة التالية :

$$(E_a - I_a Z_a) = (E_b - I_b Z_b) = V$$

والحالة العامة لعدد من المحولات تعمل على التوازي مع نسب متساوية أو غير متساوية يمكن التعامل معها بصورة أفضل إذا ماتم الإستعاضة عن الممانعات الأومية للمحولات بالمسامحات $Y_a = 1/Z_a$ الخ ، وكما موضح في الشكل 7-18 .

وكذلك ممانعات الطور لدائرة الحمل المكافئة تكون $Z_L = 1/Y_L$. كذلك تكون E_a و E_b ...الخ هي القوى الدافعة الكهربائية المحتثة في الملفات الثانوية للمحولات إذا ما نسبت جميع قيم الممانعات إلى تلك الملفات. لذا فإن

$$I = I_a + I_b + I_c + \cdots$$



الشكل 7-18 مصادر متعددة على التوازي تجهز حملا ستاتيكياً مشتركاً.

$$I_a = (E_a - V)Y_a \qquad (7.11)$$

وهكذا لبقية التيارات الأخرى.........

كذلك $I = VY_L$

بحيث أن

$$VY_L = (E_a - V)Y_a + (E_b - V)Y_b + (E_c - V)Y_c + \cdots$$

$$V = \frac{E_aY_a + E_bY_b + E_cY_c + ..}{Y_L + Y_a + Y_b + Y_c + ..} = \frac{\sum EY}{\sum Y} \qquad (7.12)$$

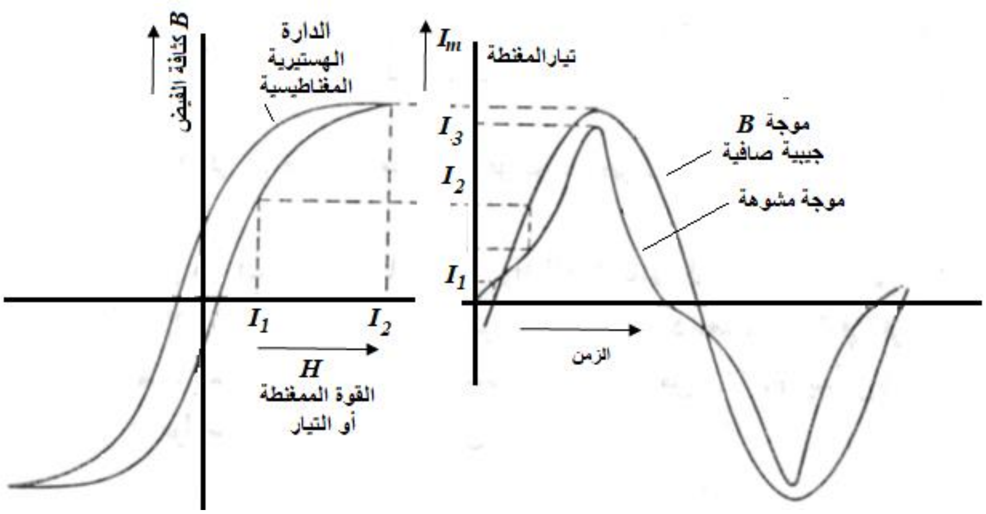
وتعرف المعادلة (7.12) بأسماء مختلفة وعديدة مثل مولد التوازي ، فولتية العقدة أو نظرية ميلمان Millman. في المعادلة (7.12) أعلاه أخذ بعين الإعتبار أن الحمل ستاتيكي ولذلك تضاءل الحد الذي يتضمن Y_L في بسط المعادلة نفسها؛ وسبب ذلك كونه مضروباً بقوة دافعة كهربائية في فرع الحمل والتي تكون قيمتها صفراً. وحالما يتم إيجاد فولتية الطرف من (7.12) يمكن أيضاً إيجاد التيارات في المحولات كل على حدة من (7.11) .

6-7 نشوء التوافقيات في المحولات الكهربائية Harmonics

إن محولات القدرة المربوطة إلى نظام قدرة يعمل بتردد 50 هرتز تجهز بفولتية تكون خالية ظاهرياً من جميع التوافقيات. ويتم تخفيض قيم التوافقيات الفردية (التوافقي الثالث والخامس والسابع ....الخ) المتولدة في فولتية المصدر إلى أدنى ما يمكن وذلك بإجراء ترتيبات مناسبة لملفات الساكن والدوار للمولدات في محطات التوليد وكذلك الدائرة المغناطيسية في المولدات. ولا تتولد التوافقيات الزوجية (إلا في الحالات العابرة وبمقادير صغيرة جداً).

إذا إفترض أن صيغة الموجة لفولتية المصدر 50 هرتزهي موجة جيبية خالصة وكذلك إفترض أن ممانعة المحول بنسبة الوحدة تكون صغيرة، عندئذ تكون الـ ق . د . ك المحتثة في الملفات وكثافة الفيض B في اللب كلتاهما موجة جيبية. ويبتعدان عن هذا الفرض فقط بسبب هبوط الفولتية في ممانعة المحول نتيجة التوافقيات في التيار وهذه لا تظهر إلا في تيار المغنطة الذي يشكل جزءً صغيراً جداً من تيار الحمل للمحول وكما سيتم بيانه هنا.

يوضح الشكل 7-19 أن كثافة الفيض تتغير بصورة جيبية مع الزمن إذا احتوى التيار الممغنط على توافقيات وذلك في حديد اللب لمحول يشتغل ضمن المدى الطبيعي للدارة المغناطيسية وهو المنحنى الذي يربط العلاقة بين تغير كثافة الفيض B مع القوة الممغنطة H أو شدة المجال المغناطيسي (المنحنى المعروف Curve B/H).



الشكل 7-19موجة تيار مغنطة مشوهة ناتجة عن كثافة فيض جيبية.

وبما أن دارة B/H تكون متماثلة فإن أنصاف دورات التيار الموجبة والسالبة تكون متماثلة أيضاً مشيرة بذلك إلى أن التوافقيات تزداد بقوة مع زيادة درجة التشبع وتكون جميعها فردية حيث يظهر التوافقي الثالث كونه الأكثر فاعلية.

إن فولتية المصدر الرئيسي عادة ما تحوي على توافقيات صغيرة وقليلة ، لذلك فأن تيار المغنطة الناتج عن التوافقيات غير كافٍ للمغنطة. على هذا الأساس فإن القوة الدافعة المغناطيسية للتوافقيات يجب أن تزود وتتقسم بين ملفات الابتدائي والثانوي والثالثي وإذا لم يكن هناك ملف ثالثي فعندئذ يسري التيار التوافقي بصورة رئيسية في الابتدائي حتى في ظروف الحمل؛ ذلك لأن دائرة الثانوي تحتوي على ممانعة الحمل والتي تكون أعلى نسبياً إذا ما قورنت بالممانعة المنخفضة للمصدر. وبسبب قلة ظهور فولتيات التوافقيات المجهزة من المصدر فانها تحتث وتخمد في الملفات نتيجة الإختلاف الجزئي لموجة الفيض عن شكلها الجيبي.

إذا كانت ممانعة التوالي للمحول هي0.1 بنسبة الوحدة عند تيار الحمل الكلي. وتيار اللاحمل هو 4% من التيار المقنن وكذلك تيار التوافقي الثالث هو 25% من تيار اللاحمل عند الفولتية والتردد المقننين، عليه فان تيار التوافقي الثالث يكون 1% من التيار المقنن. وهبوط الفولتية للتوافقي الثالث على ممانعة التوالي سوف يكون بالتقريب 3% من هبوط الممانعة عند الحمل الكلي.

في العموم، يجتمع فيض التوافقيات مع الفيض الأساسي ليعطي محصلة تكون متوسطة بين موجة جيبية وتلك التي تنشأ عن تيار مغنطة جيبي الشكل. وإذا كانت ممانعة المصدر للتوافقيات أقل بكثير من ممانعة المحول فعندئذ لا تظهر من الناحية العملية فولتية التوافقيات عبر أطراف المصدرنفسه. وكلما كانت الممانعة لتوافقي معين صغيرة صغرالفيض والـ ق . د . ك لذلك التوافقي. عليه فإذا تم ربط أحد الملفات الرئيسية أو ملف الثالثي بشكل مثلثي فإن فولتية الطور لأي توافقي مهما كانت صغيرة تكون كافية لدفع تيار من شأنه أن يدور في الشبكة نفسها وتزود بذلك الـ ق. د.ك. للتوافقيات الثلاثية المطلوبة. هذا مع العلم بان فولتية التوافقيات الثلاثية (الثالث و السادس و التاسع . . . . الخ) في كل ملف من ملفات الأطوار تكون جميعها بنفس الطور. وبناء على ذلك فان فيض اللب وفولتية الثانوي وكذلك تيار المغنطة ستحتوي جميعها على توافقيات ثلاثية أقل بكثير من المحول الذي تكون ملفاته غير مربوطة على شكل دلتا (مثلثي) . وإذا كان ملف الأبتدائي مثلثي الربط فعندئذ لاتسري تيارات التوافقيات الثلاثية من المصدر إلى المحول، لأن هذه التيارات ستدور حول الشبكة ولايظهر فرق جهد للتردد الثلاثي عند الأطراف حيث أن الـ .ق د. ك للتوافقي الثلاثي ولكل طور تمتص من قبل الممانعة العائدة لها على شكل هبوط بالفولتية. وبالإسلوب نفسه إذا كان

الثانوي مثلثي الربط. فالتيارات الدوارة للترددات الثلاثية تسري ضمن الدلتا (المثلثي) فقط وليست فى دائرة الحمل. وعليه يكون التشويه بسبب التردد الثلاثي في تيار المغنطة الإبتدائي والفيض في لب المحول وكذلك فولتية الثانوي صغيراً. أما في المحولات الثلاثية الفرع فيكون تأثير التوافقي الثالث قليلاً جداً وليس خطراً مقارنة بالمحولات الخماسية الفرع أوالمحولات المبنية من وحدات أحادية الطور (خوازن المحولات). للنوع الأول يبين الشكل 7-5 أنه لما كان مجموع فيض التردد الأساسي للأطوار الثلاثة Φ_R و Φ_Y و Φ_B يساوي صفراً ($\Phi_R + \Phi_Y + \Phi_B = 0$) فلا حاجة إذن لوجود مسار عودة لهذا الفيض. لكن فيض التوافقيات الثلاثية يكون بالطور نفسه في الأفرع الثلاثة لذلك فإن مسارالعودة لمحصلة الفيض يكون عن طريق الهواء والعازل بصورة رئيسية، عليه تكون قيم هذا الفيض صغيرة.

الآن إذا كانت نقطة التفرع النجمي لملف إبتدائي لمحول نجمي الربط متصلة مع نقطة محايد المصدر فان تيار التوافقيات الثلاثية سوف يمرعبر توصيلة المحايد هذه. ولكون ممانعة المصدر صغيرة فإن فيض اللب سيكون حاوياً على مركبات صغيرة جداً من التوافقيات الثلاثية. وإذا لم يوجد مسار عن طريق المحايد فإنه لا يمكن لتيار مغنطة التوافقيات الثلاثية أن يمر من وإلى المصدر. وإذا لم يكن هناك أيضاً ملف الثالثي مربوط بشكل مثلثي فان فيض اللب عندئذ سيحتوي على مركبات التوافقيات الثلاثية للفيض والتي يكون تأثيرها قاسياً بصورة خاصة في حالة اللاحمل؛ ومثال على ذلك فإن النتائج التالية قد أخذت مختبرياً على خازن محول تعليمي transformer bank يتالف من ثلاث وحدات أحادية الطور قدرة كل وحدة منها أقل من كيلوفولت أمبير واحد ، فبدون ربط نقطة التفرع النجمي للإبتدائي إلى نقطة التفرع النجمي للمصدر مع فتح حلقة الثالثي المربوط بشكل مثلثي ، ففي حالة اللاحمل وعندما تكون فولتية المصدر بقيمتها المقننة فإن فولتية الثانوي ستحتوي على 44% من التوافقي الثالث. وعند ربط محايد الإبتدائي أو غلق ملف الثالثي المثلثي سيقل التوافقي الثالث إلى 0.1 و 0.3% على التوالي. أما إذا تم اجراء الفحص نفسه على محول ثلاثي الطور من النوع الحاوي على لب وله الحجم نفسه إتضح أن مقدار مركبة التوافقي الثالث لفولتية الثانوي هو 1% فقط وذلك عندما يكون المحايد مفتوحا. وكذلك ملف الثالثي المثلثي الربط. وسبب صغرقيمة التوافقي الثالث يعود إلى المعاوقة العالية للمسار المغناطيسي لفيض التوافقي الثالث.

7-7 تيار المغنطة الاندفاعي **Magnetising Inrush Current**

كما هو معروف من دراسة الدوائر الكهربائية الخاصة بالتيار المتناوب أنه إذا تم إغلاق مفتاح يصل مصدر فولتية متناوبة بدائرة أحادية الطور تتكون من ملف ذي قلب هواء له محاثة L هنري ومقاومة R أوم،

عندئذ سوف يحتوي التياربصورة عامة على مركبة تيار مستمر عابرة تتضاءل تدريجياً بثابت زمن الدائرة L / R . هذه المركبة العابرة تكون لها قيمة إبتدائية تساوي ذروة التيار المتناوب فى الحالة المستقرة. هذا إذا كانت المقاومة صغيرة القيمة بحيث يمكن إهمالها. وقد يحدث ذلك إذا أغلق المفتاح عندما تمر الفولتية المتناوبة بقيمة الصفر. وعموما تحدث أقصى قيمة للحالة العابـرة إذا أغلق المفتاح عـنـد اللحظة التي تكـون الفـولتية فيــها مساوية إلى :

$$V_m = \cos\left((tan^{-1}\,\omega L)/R\right)$$

حيث فولتية المصدر هي $v = V_m \sin \omega t$.

وعندما يكون الملف ذا لب (قلب Core) حديد وتكون ذروة كثافة الفيض في منطقة التشبع المغناطيسي. كما هي الحالة فى محولات القدرة التي تشتغل بفولتية وتردد طبيعيين عندئذ يشتد التشويه العابر لتيار المغنطة بصورة كبيرة. ويعتمد ذلك على شكل منحني B/H ودرجة التشبع وكذلك لحظة غلق الدائرة وعلى المغناطيسية المتبقية في اللب الحديد.

ألآن إذا سلطت فولتية من مصدر تجهيز $v = V_m \sin \omega t$ عند لحظة $t = 0$ على ملف محول له عدد لفات N والذي يفترض أن تكون مقاومـته ومفاعلته التسربية بنسبة الوحدة مهملتين، وإذا كان أي من الملفات الأخرى مفتوح الدائرة فان الـ ق . د . ك اللحظية المحتثة في الملف والتي تساوي في المقدار وتعاكس في الإتجاه الفولتية المسلطة تكون كالآتي:

$$-N\frac{d\emptyset}{dt} = -V_m \sin \omega t$$

ويكون الفيض اللحظي المتولد

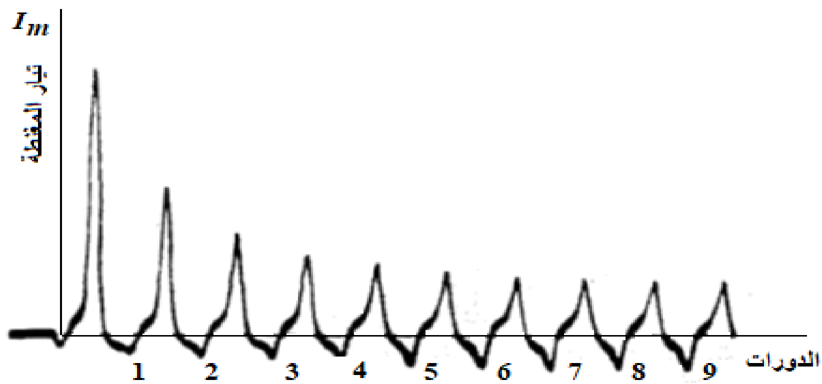
$$\emptyset = -\frac{V_m}{\omega N}\cos \omega t + A = -\Phi_m \cos \omega t + A$$

وإذا لم تكن هناك مغناطيسية متبقية في اللب تماما قبل لحظة إغلاق المفتاح بحيث ان $\emptyset = 0$ عند اللحظة $t = 0$ فان $A = \Phi_m$ وتكون معادلة الفيض:

$$\emptyset = \Phi_m[1 - \cos \omega t] \qquad (7.13)$$

يتبين من هذا أنه بعد مرور نصف دورة من موجة الفولتية ومن لحظة إقفال الدائرة عند فولتية الصفر، فإن الفيض قد يصل إلى ضعف قيمته الطبيعية. وهذا في الحقيقة لا يمكن حدوثه لأن تغير الفيض ضمن وقت قصير بعد نقطة التشغيل على منحنى المغنطة يسبب تدفق تيار مغنطة كبير بحيث إن هبوط الفولتية عبر الممانعة لايمكن إهماله في هذه الحالة؛ ويكون غلق الدائرة عملياً عند نقطة عشوائية على موجة الفولتية.

وأسوأ حالة غلق هي عندما تكون موجة الفولتية عند نقطة الصفر أو قربها وهذه لا تحدث دائما. على اية حال، توجد عادة هناك قليل من المغناطيسية متبقية في اللب. وإذا كان الفيض المتبقى هذا باتجاه الفيض المتسبب عن الفولتية المسلطة نفسها فعندئذ يكون التغير السريع واللحظي في الفيض كبيراً ٠ ويزداد ارتفاع تيار المغنطة بصورة كبيرة، لكن تيار المغنطة العابر يتضاءل بالصورة المبينة في الشكل 7-20. وتبقى الذروة الأولى للتيار عالية وقد تتجاوز بصورة ملحوظة القيمة المقننة لتيارالمحول. وفي الحالات المتطرفة يمكن أن تصل ذروة التيار الإندفاعي إلى عشرين مرة تقريباً بقدر القيمة الطبيعية لتيار الحمل الكلي.



الشكل 7-20 تيار المغنطة الاندفاعي.

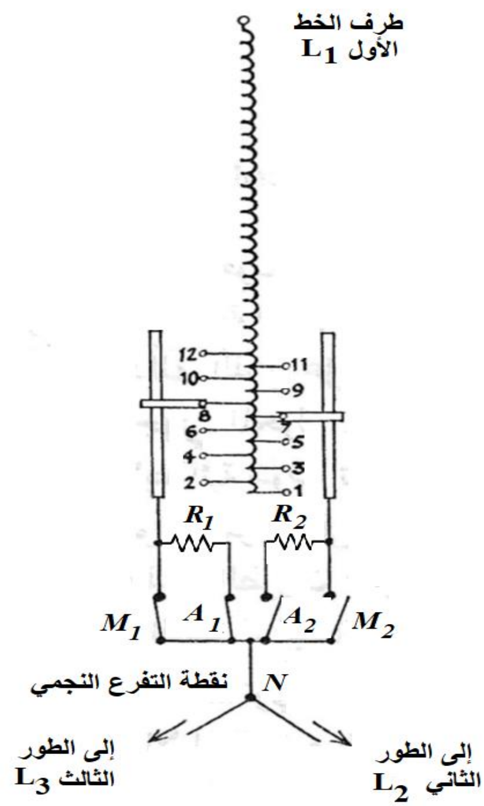
وللمحولات التي تكون قدرتها أكبر من 10 MVA يستغرق زمن هبوط الذروة الأولى للتيار الاندفاعي الى 50% من قيمتها ثانية واحدة أو أكثر. بناء عليه يجب تأمين حماية لمرحلات الحماية ضد خطأ التشغيل نتيجة التيارالإندفاعي هذا عند تشغيل المحول إلى دائرة معينة. (قد يلاحظ الطلبة هذا التأثير عند إنصهار فتيل المصهر في المختبر في حالة توصيل محول متغير Variac إلى المصدر وإلى الدائرة حتى في حالة اللاحمل). إن محولاً متغيراً بقدرة 2-kVA له تياركلي مقداره 8 أمبير وتيار مغنطة فى الحالة المستقرة 0.4 أمبير يمكن أن يعطي تياراً مقداره 60 أمبير خلال الدورة الأولى لفولتية المصدر حتى ولوكانت المغناطيسية المتبقية صفراً.

8-7 تغيير مأخذ المحول Tap Cganging

في منظومة قدرة يتطلب تغيير المآخذ على بعض المحولات تحت ظروف التحميل وذلك لكي يتم تنظيم الفولتية والإبقاء على مستواها عند المستهلكين كافة ضمن حدود معينة. على الرغم من التغير في مقدار الحمل وتوزيعه. وتكون المآخذ عاد على ملف الفولتية العالية حيث أن جعل المآخذ على ملفات فولتية

منخفضة جداً قد لا يعطى سيطرة كافية للفولتية. وتغيير المآخذ بتغيير مركبة فولتية المنظومة المتحدة الطور تؤثرعل توزيع القدرة المتفاعلة (vars) في المنظومة ولذلك قد تستخدم هذه الطريقة للسيطرة على تدفق القدرة المتفاعلة نفسها.

ويعتمد وضع واختيارمواضع المآخذ على عدة عوامل؛ منها تقليل التغيير فى ممائعة الملفات وتقليل الإجهادات الميكانيكية على الملفات إلى أدنى مايمكن حيث يؤدي ذلك إلى وضع المآخذ عند منتصف تدرجات المآخذ نفسه؛ بينما توضع الماخذ لمحولات الفولتية العالية جداً والتي لها عازل متدرج بسبب استخدامها في منظومة يكون المحايد فيها مؤرضاً في نهاية المحايد نفسه بحيث أن الفولتية إلى الأرضي تكون قليلة. ولعمل حماية إضافية ضد إندفاع وتمورالفولتية قد تربط مقاومات لاخطية الخواص عبر المأخذ. وفي الشكل 7-21 مخطط توضيحي لمغيرمأخذ في حالة الحمل لطور واحد عند نهاية محايد محول فولتية عالية ثلاثي الطور حيث يرى مفتاح إختيار يصل بين النقطتين 7 , 8 ويصل الرابط الرئيسي M_1 المحايد إلى النقاط الأخرى. وللتحويل إلى النقطة 7 يفتح M_1 ويغلق الرابط الثانوي A_2 بحيث تربط المقاومتين R_1 و R_2 بصورة وقتية على التوالي عبر الملف وبين النقطتين 7 , 8 حتى يفتح A_1 ويغلق M_2 . والسبب في استخدام المقاومتين هذه بدلاً من الملفات المفاعلة القنطرية ذات المأخذ المركزي يقلل من حدوث الشرارة في ملامسات مفتاح التغيير.



الشكل 7-21 رسم تخطيطي لمغير مأخذ في حالة الحمل.

9-7 التحميل غير المتوازن للمحولات Unbalanced Loading

إذا ربطت نقطة التفرع النجمي لإبتدائي محول ثلاثى الطورمربوطاً بشكل نجمي / نجمي يتألف من خازن ذي ثلاث وحدات أحادية الطورإلى نقطة محايد المصدرعندئذ سوف يتناسب الحمل على كل طور للإبتدائي مع ذلك الذي على الطور المناظر له في الثانوي. عليه تكون درجة الإتزان متساوية على جهتي المحول. وإذا لم تربط نقاط التفرع النجمي سوية مع بعضها فإن فولتية الطور للملفات الإبتدائية سوف تكون غير متوازنة. وبوضع حمل على طور واحد من الملفات الإبتدائية فسوف يمر تيار في الطورين الآخرين الذين ليس لهما تيار ثانوي معوض وبذلك يعمل هذان الطوران عمل خوانق Chokes لهما مفاعلة كبيرة نسبياً، أما فولتيتاهما فتكون مساوية لفولتية الخط، بينما تكون فولتية الطور الذي عليه الحمل قليلة، ولهذا السبب تكون فولتبة الأطوار للثانوي غير متوازنة. لذا لايستخدم هذا النوع من الربط إذا كان الحمل غير متوازن إلا إذا كان هناك ملف ثالث (ملف الثالثي) مربوط بشكل دلتا (مثلثي) الذي يهىء ق .د .مغ . في كل محول ويحاول بالنتيجة مساواة الفولتيات وتظهر مثل هذه المعضلة في حالة المحول ذي الأفرع الخمسة ايضاً.

ولمحول ذي لب ثلاثي الفرع تكون معاوقة لمسار المغناطيسي الذي تعمل عليه الـ ق.د. مغ اللامتوازنة في الأفرع الثلاثة كبيرة نسبياً بحيث أن فيض القلب وفولتيات الطور لاتكون متوازن إلى حد معين. ومن الممكن إيجاد توزيع التيارفي المحول ذي اللب الثلاثي الفرع أوالخماسي الفرع كما يأتي:

إذا تم عزل نقطة التفرع النجمي للأبتدائي ومر تيار I في حمل مربوط بين طرف الثانوي a ونقطة المحايد، عندها يمكن إيجاد تيارات الطور في الإبتدائي I_A وI_B و I_C من مساواة قيمة الأمبير- لفة للإبتدائي والتي يجب أن تكون موجودة بين كل زوج من أطراف الخط ذاته. ذلك لكون أن فولتيات الخط للمصدر تكون متوازنة. وإذا كان هناك N_P عدد لفات في كل طورمن ملف الإبتدائي وكذلك N_S في كل طورمن ملف الثانوي؛ عليه تكون المساواة في الامبير- لفة بين الطرفين A و B للإبتدائي والثانوي بحيث أن محصلة الأمبير - لفة بين أطراف الخط تكون صفراً في جميع الحالات. وهذا يعطى :

$$(I_A - I_B)N_P - IN_s = 0 \qquad (7.14)$$

وكذلك بين الطرفين B و C

$$(I_B - I_C)N_P = 0$$

بحيث أن $I_B = I_C$ وهذا ظاهر من التماثل وبتعويضه في $I_A + I_B + I_C = 0$ ينتج

$$I_A = -2I_B$$

I_B , I_A يكونان في الطور نفسه سوية وعليه ومن المعادلة (7.14)

$$\begin{cases} I_A = \dfrac{2}{3} I \dfrac{N_S}{N_P} \\ I_B = I_C = -\dfrac{1}{3} I \dfrac{N_S}{N_P} \end{cases} \qquad (7.15)$$

وكما تم شرحه في الفقرة 6.10. بما أن المعاوقة العالية المسارفيض التتابع الصفري في محول ثلاثي الطورذي قلب تحدد من قيمته فان عدم التوازن فى الفيض وإزاحة جهد المحايد تكون أقل لهذا النوع من المحولات من تلك المتألفة من ثلاث وحدات أحادية الطور.

ويساعد وجود ملف الثالثي المربوط مثلثيا (N_t لفات / طور) على استقرار جهد محايد الإبتدائي وذلك لأن تيار تتابع صفري قدره $1/3 \times I(N_S/N_t)$ يدور ضمن الشبيكة يعادل الـ ق.د. مغ على الأفرع الثلاثة، وهذا التيارلا يتغيربأي حال من الأحوال بسبب أن الـ ق.د. مغ لتيارالتتابع الصفري على الفرع A تلغي تماماً تلك التي على الفرع B وبالإسلوب نفسه فإن المعادلة (7.14) سوف لاتتغير بحيث أن توزيع التيارات في الإبتدائي والمعبرعنه بالمعادلة (7.15) لايتأثر بوجود ملف الثالثي المربوط بشكل مثلثي .

وقد تستخدم طرق المركبات المتماثلة لحل حالات التحميل غير المتوازن بديلاً لإستخدام موازنة القوة الدافعة المغناطيسية المبينة في أعلاه ولكن هذه الطرق لا تتعامل مع التوافقيات التي قد يكون لها تأثير محسوس.

10-7 الدائرة المكافئة لمحول ثلاثي الملف

Three-winding Transformer Equivalent Circuit

إذا أهمل تيار اللاحمل لمحول ثلاثي الملف فيمكن عندئذ رسم دائرة مكافئة مفردة وبسيطة لطور واحد ومنها يمكن تقييم عملية حالات التحميل المتوازنة للملفات الثلاثة للمحول. ومن المناسب أكثرمن ذلك تمثيل الممانعات بنظام نسبة الوحدة. لذلك يجب أن تعطى جميعها إلى الإساس نفسه بالميكافولت أمبير MVA يتحقق هذا الإعتبار الأخير ذاتيا في المحولات الثنائية الملف حيث أن ملفات الإبتدائي والثانوي لها تقنين الـ MVA نفسه. وفي المحولات الثلاثية الملف مع انه قد تكون ملفات الأبتدائي والثانوي لها تقنين القدرة MVA نفسه. وقد لاتكون فإن ملف الثالثي سوف يكون أقل بالطبع.

إذا أجريت فحوص الدائرة القصيرة على محول ثلاثي الملف له N_t , N_s , N_P لفات / طور وعلى الملفات الثلاثة بالتعاقب يمكن قياس الممانعات الاومية (المتألفة من ممانعة ومفاعلة تسريية) الآتية:

Z_{ps} = ممانعة مقاسة في دائرة الإبتدائي عندما يكون الثانوي مقصور الدائرة والثالثي مفتوحاً.

Z_{Pt} = ممانعة مقاسة في دائرة الإبتدائي عندما يكون الثالثي مقصور الدائرة والثانوي مفتوحاً.

Z'_{st} = ممانعة مقاسة في دائرة الثانوي عندما يكون الثالثي مقصور الدائرة والأبتدائي مفتوحاً.

وقد تسند أيضا Z'_{st} الى ملف الابتدائي بحيث ان $Z_{st} = \left(\frac{N_P}{N_s}\right)^2 Z'_{st}$

وإذا كانت كل من Z_p و Z_s وكذلك Z_t الممانعات الأومية للملفات الثلاثة المنفصلة منسوبة إلى مستوى فولتية الأبتدائي، عليه

$$\begin{cases} Z_{ps} = Z_p + Z_s \\ Z_{pt} = Z_p + Z_t \\ Z_{st} = Z_s + Z_t \end{cases} \tag{7.16}$$

وتكون حصيلة المعادلات (7.16)

$$\begin{cases} Z_p = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \\ Z_s = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \\ Z_t = \frac{1}{2}(Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \end{cases} \tag{7.17}$$

إذا كانت:

Z_{ps} = الممانعة بنسبة الوحدة المناظرة الى Z_{ps} منسوبة الى الـ MVA والفولتية المقننتين للابتدائي.

Z_{pt} = الممانعة بنسبة الوحدة المناظرة الى Z_{pt} منسوبة الى الـ MVA والفولتية المقننين للابتدائي.

Z'_{st} = الممانعة بنسبة الوحدة المناظرة الىZ'_{st} منسوبة الى MVA والفولتية المقننين للثانوي ، عليه فأن:

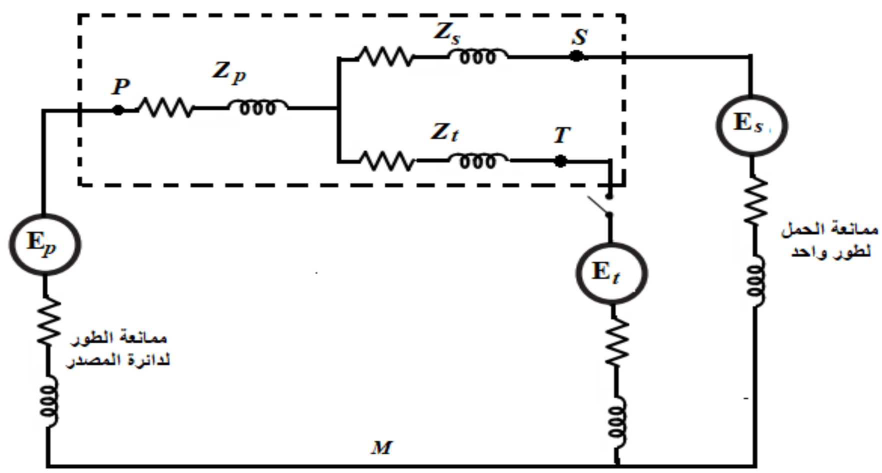
Z_{st} هي الممانعة بنسبة الوحدة بين ملفي الثانوي والثالثي عندما يكون الأبتدائي مفتوحا ومنسوبة الى MVA والفولتية المقننين للأبتدائي وتعطى كمايلي:

$$Z_{st} = Z'_{st} \frac{\text{للابتدائي } MVA}{\text{للثانوي } MVA}$$

بما أن نسبة الفولتيات المقننة هي نفسها نسبة الملفات لذا تصبح (7.17)كالآتي:

$$\begin{cases} Z_p = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \\ Z_s = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \\ Z_t = \frac{1}{2}(Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \end{cases} \qquad (7.18)$$

حيث أنZ_p و Z_s و Z_t هي الممانعات بنسبة الوحدة للملفات الثلاثة كل منها منسوبة الى الـ MVA والفولتية المقننين لملف الإبتدائي. قد تربط الآن الممانعات الثلاثة هذه سوية في دائرة نجم مكافئة أحادية الطور وكما مبينة في الشكل 7-22 ويمثل الجزء ضمن الخطوط المقطعة المحول. وما كان خارج هذه الخطوط يمثل دائرة الربط الخارجية للمحول.



الشكل 7-22 دائرة مكافئة لطور واحد من محول ثلاثي الملف.

قد تكون E_t وكذلك تيار تردد القدرة في الثالثي صفراً إذا أحتوى على ملف مربوط بشكل مثلثي مغلق وغير مربوط لأي منظومة تجهيز أو حمل. وفي هذه الحالة يكون الطرف T معزولاً عن المنظومة ، في الحقيقة يدور تيار التردد الثلاثي في ملف الثالثي لكي ينتج القوة الدافعة المغناطيسية اللازمة للأبقاء على فيض اللب جيبياً بصورة أساسية. لكن الشكل 7-22 يعود إلى الحالات التي يكون فيها التردد هوتردد القدرة

50-Hz. وإذا جهز الثانوي حملاً ستاتيكياً فقط تكون E_s صفراً، وترتبط S مع M عن طريق ممانعة دائرة الحمل. ترتبط P مع M بفولتية الطور للمصدر E_p وكذ لك بمانعة دائرة المصدر/ طور. مما يجب تأكيده هو أن الدائرة الموضحة في الشكل 7-22 تطبق في الحالات المتوازنة، أي إلى تيار التتابع الموجب أوتيار التتابع السالب فقط وتمثل طوراً واحداً. يمكن تمثيل المحولات الذاتية الثلاثية الملف والتي تستخدم بصورة شائعة مع فولتيات النقل العالية بدائرة مكافئة مماثلة.

الفصل الثامن
نقل الطاقة الكهربائية بواسطة الكيبلات المطمورة في الأرض
UNDERGROUND CABLES POWER TRANSMISSION

8-1 مقدمة

تستعمل الكيبلات لأغلب أغراض نقل وتوزيع القدرة الكهربائية للفولتية المتوسطة والعالية وهي وسيلة مرادفة للخطوط الهوائية المعلقة. وتكون كيبلات نقل الطاقة الكهربائية عادة طويلة حيث تنقل القدرة الكهربائية لمسافات بعيدة وتقوم بتوزيعها، وتستخدم الكيبلات القصيرة نسبيًا لنقل الفولتية المتوسطة وتكون كيبلات نقل الطاقة عادة مدفونة تحت الأرض، كما يتم استخدام الكيبلات الطويلة بصفة كيبلات بحرية تحت البحر لنقل الطاقة. وتستعمل الكيبلات الأرضية عادة في الأماكن المأهولة بالسكان. وتتكون كيبلات الفولتية العالية من موصل واحد غليظ أو أكثر مركزي لنقل الطاقة، ويكمله عازل وستارة واقية. وتختلف كيبلات الفولتية العالية عن كيبلات الفولتية المنخفضة من حيث مساحة مقطع الموصل كما أنها تحتوي على طبقات داخلية إضافية في ستارة العازل للتحكم في المجال الكهربائي حول الموصل.

إن الورق المجفف والمعد بعناية يشكل عازلاً مقبولاً لكيبلات الفولتية العالية الذي استعمل كثيراً في صناعة هذه الكيبلات. ووجد كذلك أنه بإضافة درع موصل يحيط بكل موصل معزول من شأنه أن يعادل الإجهاد الكهربائي على عازل الكيبل. ويتم توصيل دروع الموصل الفردية للكيبل بالأرض عند أطراف الدرع وعند التوصيلات. واستخدم في عزل الكيبلات أيضاً مادتي الزيت والورق وتغطيتها بأنبوب من الصلب أو غلاف من الألمونيوم شبه صلب أو رصاص. كذلك بالنسبة لقيم فولتيات أعلى يمكن الاحتفاظ بالزيت تحت ضغط معين لمنع تشكل الفراغات التي تتيح التفريغ الجزئي في عازل الكيبل.

لقد كانت الكيبلات متوسطة الجهد المعزولة بالورق المشبع فعالة تجارياً في أوائل سنين القرن الماضي لكنه في منتصف القرن الماضي تم تطبيق العديد من أساليب العزل باستخدام المطاط الاصطناعي والبولي إثيلين على الكيبلات. لكنه بعد اكتشاف مادة البلاستك في أواخر الخمسينيات من القرن الماضي تم استخدام هذه المادة الحيوية بكثرة في عزل وصناعة الكيبلات بصورة عامة ورئيسية. وتستخدم كيبلات الفولتية العالية الحديثة البوليمرات أو البولي إيثلين، بما في ذلك البولي أثيلين المترابط عرضياً (XLPE) للعزل.

8-2 الكيبلات القديمة وحيدة اللب المعزولة بالورق

منذ بداية القرن الماضي استعملت الكيبلات وحيدة اللب (ذات موصل واحد) المعزولة بالورق ذات الغلاف المعدني لمعظم تطبيقات نقل الطاقة بالفولتيات العالية وكانت تصنع بنوعين رئيسيين:

(أ) النوع المصمت: هذا النوع لا يتم فيه رفع الضغط ضمن الورق المشبع بالزيت فوق الضغط الجوي الاعتيادي، وقد يهبط إلى أقل من ذلك خاصة في الفجوات الموجودة ضمن العازل مما قد يتسبب في انهيار العزل عند الفولتيات العالية. لذلك فإن هذا النوع لم يستعمل في ذلك الوقت لفولتيات أعلى من 33 كيلو فولت.

(ب) الكيبلات المضغوطة بالغاز أو الزيت: يتم في هذه الكيبلات إدامة الضغط بقيمة أعلى من الضغط الجوي إما بواسطة ضخ غاز سادس فلوريد الكبريت SF6 أو غاز خامل مثل النيتروجين بالنسبة للكيبلات المضغوطة بالغاز أو بواسطة ضخ الزيت بالنسبة للكيبلات المملوءة بالزيت. ووفقا لذلك إما أن تمتلئ الفجوات بالغاز أو الزيت عند ضغط عالٍ أو إنها لا تتكون هناك فجوات تذكر. ويبين الشكل 8-1 صورة لكيبل 69 كيلو فولت مملوء بالزيت.



الشكل 8-1 لكيبل 69 كيلو فولت مملوء بالزيت.

في الكيبلات التي تستعمل لفولتيات لحد 275 كيلو فولت يتم منع تكون الفجوات وذلك باستعمال غاز ذي ضغط عالٍ لمنع حدوثها تماما. وهناك كيبلات مملؤة بالزيت تستعمل لفولتيات أعلى من 400 كيلو فولت. وقد استخدم العازل الورقي الملفوف تراكبياً في أغلب أنواع كيبلات الفولتية العالية. وجرت أيضا محاولات عديدة لإستعمال الورق الصناعي بدل العازل الورقي العادي لتقليل الكلفة.

8-3 الكيبلات الثلاثية اللب القديمة

كيبلات الفولتية العالية القديمة الثلاثية اللب كانت على ثلاثة أنواع ولاتزال في الخدمة في كثير من البلدان إلى وقتنا الحاضر وهي :

1- الكيبلات النوع المصمت Solid-Type Cables

2-الكيبلات المملوءة بالزيت Oil-Filled Cables

3- الكيبلات المضغوطة بالغاز Gas- Pressure Cables

- الكيبلات النوع المصمت: في هذه الكيبلات يجفف العازل ثم يشبع بالزيت بعد أن يكون الورق قد تم لفه حول الموصلات. في الكيبل المحزوم الثلاثي القلب يتغير المجال الكهربائي من لحظة الى أخرى حيث أنه في الحقيقة يدور بسرعة ثابتة ويسبب إجهادات عالية خاصة في الأماكن القريبة من سطوح الموصلات وكذلك إلى الغلاف. هذه الإجهادات تكون عرضية ويمكن أن يتم بقاءها عند قيم يمكن للعازل أن يتحملها في حالة كونها عمودية على سطحه. المتانة الكهربائية للورق تكون أقل في الاتجاه الطولي للألياف منها في الاتجاه العمودي عليها. إضافة لذلك فإن احتمال تكون الفجوات يكون أكثر في حدود مادة الحشوة أو خلالها. وتأيين الغاز في الفولتيات العالية في هذه الفجوات يمكن أن يؤدي الى انهيار العازل تماماً. ولغرض استعمال هذا النوع من الكيبلات لفولتيات أعلى من 33 كيلو فولت فقد أضيف في وقتها مشبك معدني مؤرض حول عازل كل موصل. هذا العازل يتألف من طبقة رقيقة معدنية مثقبة بحيث أن الزيت أو الغاز يمكن أن يمر من خلالها بحرية تامة. على هذا الأساس تم تحسين العزل بين الموصلات واستخدمت هذه الكيبلات لفولتيات تصل الى 66 كيلو فولت.

- الكيبلات المملوءة بالزيت: في هذه الكيبلات يتم منع حدوث الفجوات في العازل باستخدام زيت ذي لزوجة منخفضة تربط خزانات الزيت إلى الكيبل عن طريق قنوات تتألف من أنبوب حلزوني مصنوع من الحديد الصلب (الفولاذ) أو الألمنيوم ويتم ضخ الزيت في الأنبوب بضغط جوي واحد، ويدام هذا الضغط بحيث لا يقل عن الضغط الجوي بأي حال من الأحوال. في هذه الطريقة يتم الحصول على إجهاد تفريغ بحوالي 300 الى 400 كيلو فولت وهو أكثر بكثير من ذلك للكيبل النوع المصمت. لهذا السبب استخدم الكيبل المشبع بالزيت بنجاح لنقل الطاقة الكهربائية بفولتيات 132 كيلو فولت في حينها. وازداد استعمال هذه الكيبلات لنقل الطاقة عند 33 كيلوفولت كما ازداد أيضاً في الفولتيات الأعلى.
- الكيبلات المضغوطة بالغاز: وتكون هذه الكيبلات على نوعين رئيسيين
  - كيبلات مملوءة بالغاز
  - كيبلات الإنضغاط

في الكيبلات المملوءة بالغاز يشبع العازل الورقي بهلام بترولي قبل لفه على الموصلات، وتملأ الفراغات بين طبقات الورق بعد ذلك بغاز النتروجين الجاف المضغوط لحد ضغط مقداره تقريباً 1.38×10^6 نيوتن / متر مربع مكوناً عازلاً مركباً. وكيبلات الانضغاط إما أن تكون ذات إنضغاط زيتي أو غازي ويتم ضغط الغاز أو الزيت داخل أنبوب من الحديد الصلب ويتخلل الزيت او الغاز عازل الموصلات الثلاثة وذلك لمنع تكون الفجوات ويمكن في هذه الحالة استخدام الكيبلات المضغوطة لفولتيات عالية قد تصل الى 275 كيلو فولت.

8-4 الكيبلات الحديثة نوع XLPE

بظهور البوليمرات في بداية الستينيات من القرن الماضي شاع استخدام هذه الأنواع من العوازل وخاصة في كيبلات الفولتية المتوسطة ولحد 35 كيلوفولت خاصة العازل نوع XLPE و EPR وقد تم تطوير كيبلات بعازل نوع XLPE للعمل بفولتيات 500 كيلو فولت في الوقت الحاضر. ويعد العازل نوع XLPE والتطويرات المتلاحقة التي جرت عليه خلال النصف قرن الماضي طفرة نوعية في صناعة الكيبلات ذات الفولتية العالية بحيث أصبحت الأنواع القديمة مثل الكيبلات المضغوطة بالغاز والمملوءة بالزيت وكذلك الكيبلات الأنبوبية في عداد الملغاة في الصناعات الحديثة.

إن العازل نوع متعدد الأثلين المترابط مستعرضا Cross-linked polyethylene (XLPE) أصبح في الوقت الحاضر هو العازل المفضل عالمياً لصناعة كيبلات القدرة لغرض النقل والتوزيع للطاقة الكهربائية. منظومة العوازل هذه تؤمن كفاءة كلف في التشغيل إضافة إلى احتياجها القليل للصيانة والأمور البيئية مقارنة بالعوازل المصنوعة من الورق المشبع القديمة . ويمتلك عازل XLPE مميزات ممتازة كثيرة خاصة عند استعماله في درجات حرارة عالية. والمحاسن الأساسية لهذا النوع من العازل تتلخص بما يأتي:

- سعة حمل تيار عالية
- الاشتغال بدرجة حرارة أعلى (90 °C) ويمكن أن يشتغل بدرجة حرارة تصل إلى 105 °C في الحالات الطارئة لكن لفترة لا تزيد عن 72 ساعة كمعدل أقصى شرط ألا تزيد هذه الفترة على 216 ساعة خلال السنة الواحدة. وإذا فرضنا أن العمر التصميمي للعازل هو 40 سنة هذا يعني أن الكيبل يستطيع أن يتحمل الاشتغال التراكمي بدرجة حرارة 105 لمجموع ساعات مقدارها 2880 ساعة.
- خلال تعرضه للعطل الدائرة القصيرة يتحمل درجة حرارة قد تصل الى 250 °C.
- مفاقيد العزل الزاوي Dielectric loss angle أقل بكثير من العوازل الاعتيادية المألوفة لذلك فاستخدام العازل XLPE في الفولتيات العالية سيؤدي إلى توفير كبير في الكلفة.

- الملحقات تكون بسيطة وكلفتها قليلة كون ان العازل المبثوق Extruded insulation يمتلك خواص كهربائية ممتازة مما يجعل استعماله كحل بسيط للوصلات ونهايات الكيبل Joints and terminations مقارنة بالكيبلات المملوءة بالزيت التي كان عمل الوصلات والنهايات لها تستغرق وقت كبير وجهد ومواد مختلفة كثيرة، فوصلة الكيبلCable joint الواحدة في الكيبلات القديمة الثلاثية الطور كانت تستغرق ما بين 6 إلى 8 ساعات لعملها، بينما لا تستغرق وصلات كيبلات XLPE الحديثة أكثر من ساعة واحدة.
- تقشير الكيبل سهل جداً ولا يتطلب وقت كبير
- تيار الشحن للكيبل يكون قليل بالنسبة للكيبلات التي تستخدم عوازل من نوع آخر. هذا يعني أن ضبط أجهزة الحماية للكيبل تكون بقيم متدنية.
- سهولة التركيب لكون أن الكيبل XLPE يتحمل أقطار ثني صغيرة ويكون خفيف الوزن بصورة عامة. إضافة لذلك فان تقشير الكيبل والتعامل مع نهاياته سهل جداً.
- لا يوجد تحديد على الارتفاعات في نصب وتثبيت الكيبل كونه لا يحتوي على زيوت لذلك يكون احتمالية عطله غير موجودة بسبب نزوح وارتحال ذرات الزيت كما هو الحال في الكيبلات المملوءة بالزيت.
- الأسباب العديدة المذكورة في أعلاه سوية مع مقاومته الجيدة لإجهادات الظروف البيئية والتصدع وثابت العزل المنخفض الكيبل XLPE ملائم جداً للاستخدام في نقل الطاقة الكهربائية بفولتيات عالية وفولتيات عالية جداً.

1-4-8 تصميم الكيبل نوع XLPE

للفولتيات العالية والعالية جداً تمتلك الكيبلات نوع XLPE خواص تصميمية موحدة ليست لها علاقة بالفولتية والتردد المقننين. والعناصر التي تحدد سلوك الكيبل الكهربائي والحراري عموماً هي نوع الموصل ونوع العازل بطبقتيه الداخلية والخارجية المحددتين للمجال الكهربائي، إضافة الى الستارة المعدنية الحاجبة.

سمك العازل Insulation Thickness

يتم تصميم وحساب سمك (ثخن) العازل للفولتيات والفولتيات العالية جداً بواسطة تطبيق ثلاث طرق تصميمية تتصف بالآتي:

- معدل شدة المجال الكهربائي الذي يمكن للعازل تحمله خلال فترة زمنية قدرها ساعة واحدة (الطريقة – A).
- معدل شدة المجال الناجم عن ضربة صاعقة دفعية التي يستطيع العازل مقاومتها (الطريقة - B).

- مقدار تحمل أقصى شدة مجال دفعية عند الموصل نفسه (الطريقة – C).

الطريقتان (A) و (B) يمكن أن تمثل بالمعادلات التالية حيث يعد ناتج أكبر قيمة للعازل من هذه المعادلات بمثابة أصغر قيمة مطلوبة لسمك العازل.

المعادلة الخاصة بالطريقة (A)

$$T_{A\ \text{الطريقة}} = k_o \times k_t \times k_T \times \frac{U_o}{E_{doc}}$$

حيث أن :

$T_{A\text{الطريقة}}$: سمك العازل محسوب من الطريقة (A)

U_0 : الفولتية الإسمية (فولتية الطور بالكيلو فولت)

E_{dac} : شدة التحمل للفولتية (لمدة ساعة واحدة) (كيلو فولت لكل ملمتر)

k_T : عامل درجة الحرارة

k_o : عامل الفولتية الزائدة

k_t : عامل تقادم العمر

المعادلة الخاصة بالطريقة (B)

$$T_{B\ \text{الطريقة}} = k_s \times k_f \times k_T \times \frac{U_o}{E_{dimean}}$$

حيث أن :

$T_{B\text{الطريقة}}$: سمك العازل محسوب من الطريقة (ب)

U_{BIL} : الفولتية الدفعية الأساسية (بالكيلو فولت)

E_{dimean} : معدل قوة الدفعة (كيلو فولت لكل ملمتر)

k_T : عامل درجة الحرارة

k_f : عامل التكرار

k_s : عامل الأمان

المعادلة الخاصة بالطريقة (C)

$$T_{C\ \text{الطريقة}} = \left[e^{\left(k_s \times k_f \times k_T \times \frac{U_{BIL}}{E_{dimax}} \times \frac{1}{r}\right)} - 1\right] \times r$$

حيث أن:

$T_{C\ \text{الطريقة}}$: سمك العازل محسوب من الطريقة (C)

U_{BIL} : الفولتية الدفعية الأساسية (بالكيلو فولت)

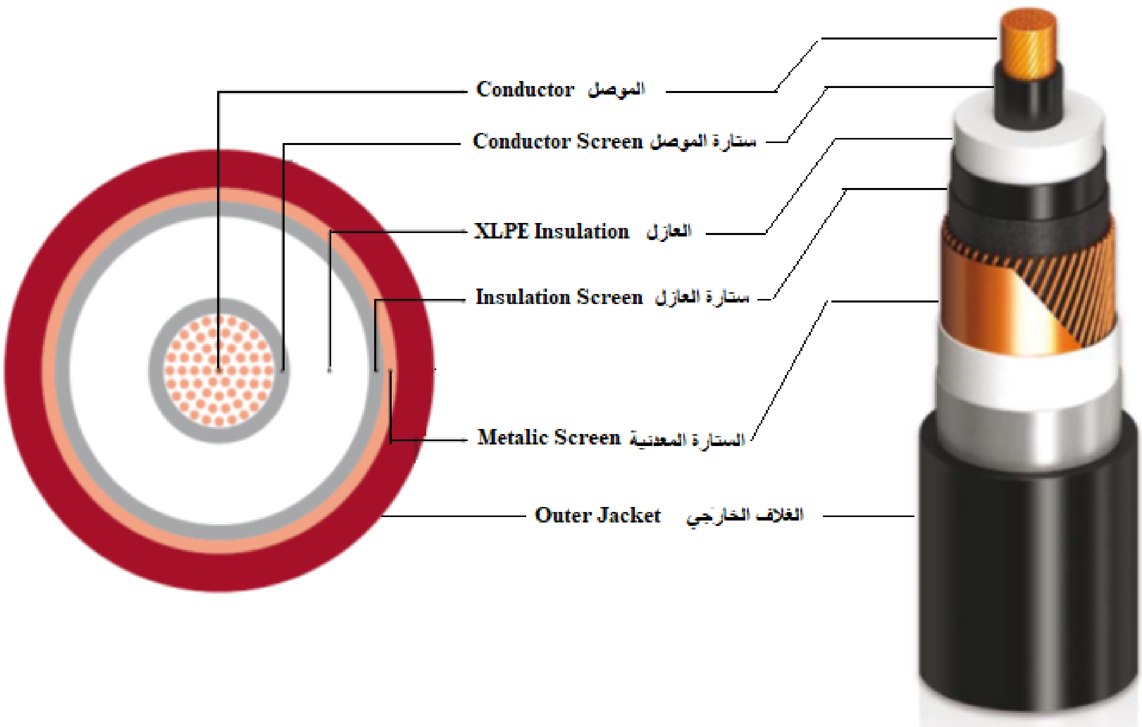
E_{dimax} : قوة الدفعة (كيلو فولت لكل ملمتر)

r : نصف قطر طبقة شبه الموصل الداخلية

k_T : عامل درجة الحرارة
k_f : عامل التكرار
k_s : عامل الأمان

8-4-2 بنية الكيبل نوع XLPE Cable Structure XLPE

البنية التي سيتم شرحها فيما يأتي تنطبق على كيبلات XLPE للفولتية العالية والعالية جداً من 66 كيلوفولت ولغاية 230 كيلو فولت داخل، الشكل 8- 2. هذه البنية تشمل المواد الأساسية وكالآتي:



الشكل 8-2 كيبل نحاسي أحادي القلب معزول XLPE ومغلف بصفيحة نحاسية.

1- الموصل: وظيفة الموصل هي نقل التيار الكهربائي بأقل مفاقيد ممكنة. ويجب أن يتم اختيار الموصل وتصميمه من مواد جيدة لها خواص كهربائية جيدة إضافة الى خواص ميكانيكية تؤمن قوة شد ممتازة والقابلية على الثني أو الإنحناء للكيبل. أما المواد فيجب أن تكون إما نحاس عالي التوصيلية الملدن بلطف أو الألمنيوم البسيط.

يتميز سلوك الموصل بظاهرتين جديرتين بالملاحظة وهما ظاهرة التأثير القشري Skin effect وظاهرة الجوار Proximity effect أو ما تسمى بظاهرة التقارب. التأثير القشري هو تكثف مرور التيار حول السطح الخارجي للموصل ويزداد بالتناسب مع مساحة المقطع العرضي للموصل المستخدم. أما ظاهرة الجوار أو التقارب فتنشأ عندما تكون المسافة التي تفصل بين الأطوار الثلاثة للدائرة نفسها قصيرة. فعندما يكون قطر الموصل كبير بالنسبة للبعد الذي يفصل بين موصلات الأطوار الثلاثة عندئذ يميل التيار

الكهربائي للتمركز على السطوح المواجهة للموصلات نفسها. في الواقع أن أسلاك الموصل التي تواجه السطح تكون لها محاثة أصغر من تلك التي هي بعيدة عنه، لذا فإن التيار سوف يميل إلى الدوران في الأسلاك التي لها محاثة قليلة، ومن الناحية العملية يكون تأثير الجوار أضعف من تأثير القشرة ويتضاءل بسرعة عندما تبتعد الكيبلات عن بعضها فمثلاً يهمل تأثير الجوار عندما تكون المسافة بين كيبلين أحاديا اللب في الدائرة نفسها أو في دائرتين متجاورتين 8 مرات بقدر القطر الخارجي للكيبل.

تصمم الموصلات نفسها عادة بنوعين:

- المجدول الدائري المدمج (المضغوط) Compacted round stranded أو
- المجدول المقطَع دائرياً المسمى بـ المليكاني Segmental *''Milliken''* stranded .ويحتوي الموصل المجدول الدائري المدمج على عدة طبقات من الأسلاك المتحدة المركز والملفوفة حلزونياً . وبسبب المقاومة المنخفضة للتماس الكهربائي بين الأسلاك لهذا النوع من التصميم فإن تأثير القشرة والجوار يكونان ظاهرياً مساويان للموصلات المصمتة البسيطة الدائرية. هذا التصميم يستعمل لمساحات مقاطع لحد وتتضمن قياس 800 ملمتر^2 للنحاس أو الألمنيوم كليهما.

أما الموصل المجدول المقطَع دائرياً المليكاني فيحتوي على عدة موصلات شكلها قطوع دائرة مجمعة مع بعضها لتكوين لب أسطواني كما مبين في الشكل 8-3. ويتم تقسيم الموصل ذي مساحة مقطع كبيرة إلى عدة موصلات لها شكل قطاعات دائرة ويتم عزل هذه القطاعات عن بعضها بواسطة شرائط غير موصلة أو عازلة لتقليل تأثير التجاور. ويستخدم هذا التصميم للموصلات النحاسية التي تزيد مساحة مقطعها العرضي عن 1000 ملمتر^2. وللألمنيوم 1200 ملمتر^2. التصميم المليكاني هذا يقلل إلى حد كبير تأثيري القشرة والتجاور.

2- العازل Insulation

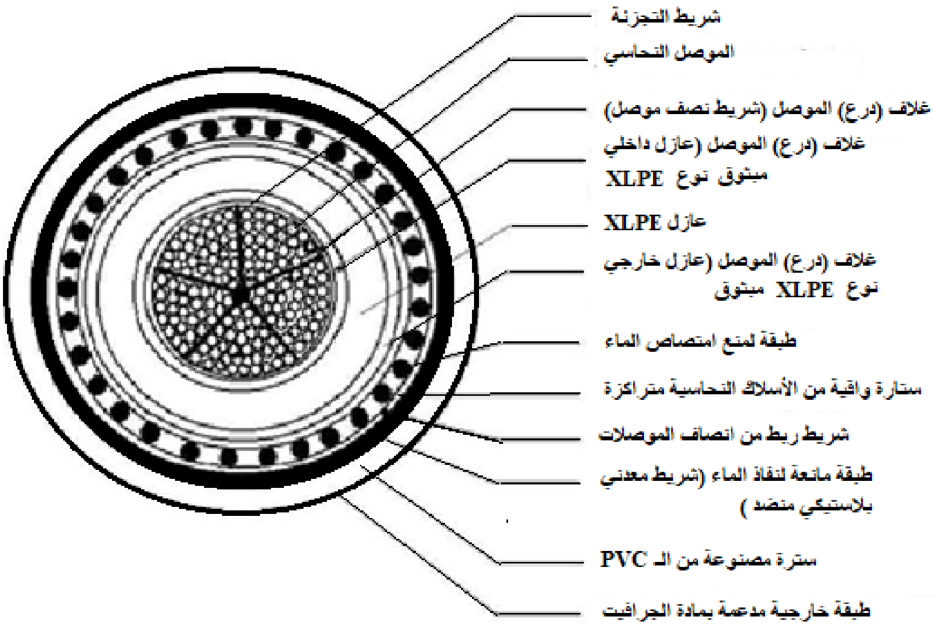
يجب أن يكون العازل بكفاءة بحيث يتحمل المجال الكهربائي في ظروف الاشتغال الطبيعية المقننة والظروف العابرة الوقتية. مادة العازل هي متعدد الأثلين المترابط عرضيا XLPE المجفف بالتبريد ويجب أن يكون نظيفاً لدرجة عالية جداً ويمتلك خواص كهربائية وفيزيائية ممتازتين.

3- ستارة الموصل Conductor Screen

تصنع هذه الستارة عادة من بثق مركب نصف موصل فائق النعومة على طول الموصل لغرض منع تركيز المجال الكهربائي بين العازل الرئيسي XLPE والموصل نفسه.

4- ستارة العازل Insulation Screen

هذه الطبقة لها وظيفة ستارة الموصل نفسها. التي يتم عندها التحول من المحيط العازل الذي يكون فيه المجال الكهربائي موجود إلى الوسط الموصل المتمثل بستارة الكيبل المعدنية الذي يكون فيها المجال الكهربائي صفراً (معدوم تماماً). ويجب أن تكون ستارة العازل موضوعة مباشرة على العازل وحاوية على بثق لمركب نصف موصل. كذلك يجب أن تثبت وتحيط إحاطة تامة بالعازل. وتجدر الإشارة إلى أن ستارة الموصل وعازل XLPE وستارة العازل يتم بثقها في الوقت نفسه في عملية واحدة باستخدام طريقة البثق الثلاثي (خط الفلكنة أو التقسية بالكبريت المستمر). إن طريقة البثق الثلاثي لا تؤمن تداخل نظيف بين العازل وطبقات التحكم بالجهد فقط، لكنها تؤمن أيضاً بنية خالية من التفريغ الجزئي بوثوقية تشغيل عالية.



الشكل 8- 3 مقطع عرضي في كبل 400 كيلو فولت، يبين موصلاً من النحاس المجزأ في الوسط وطبقات شبه موصلة وعازلة وموصلات ذات درع نحاسي وغلافًا من الألمونيوم وسترة خارجية من البلاستيك.

5- الستارة المعدنية Metallic Screen

عندما يصل مستوى الفولتية إلى عشرات أو مئات الكيلو فولت يكون من الضروري وضع ستارة معدنية تحتاج أيضاً للتأريض في نقطة واحدة في الأقل على طول مسار الكيبل. الوظيفة الرئيسية لهذه الستارة هي لتصفير المجال الكهربائي خارج الكيبل، كذلك فإن لها وظائف أخرى تتلخص بالآتي:

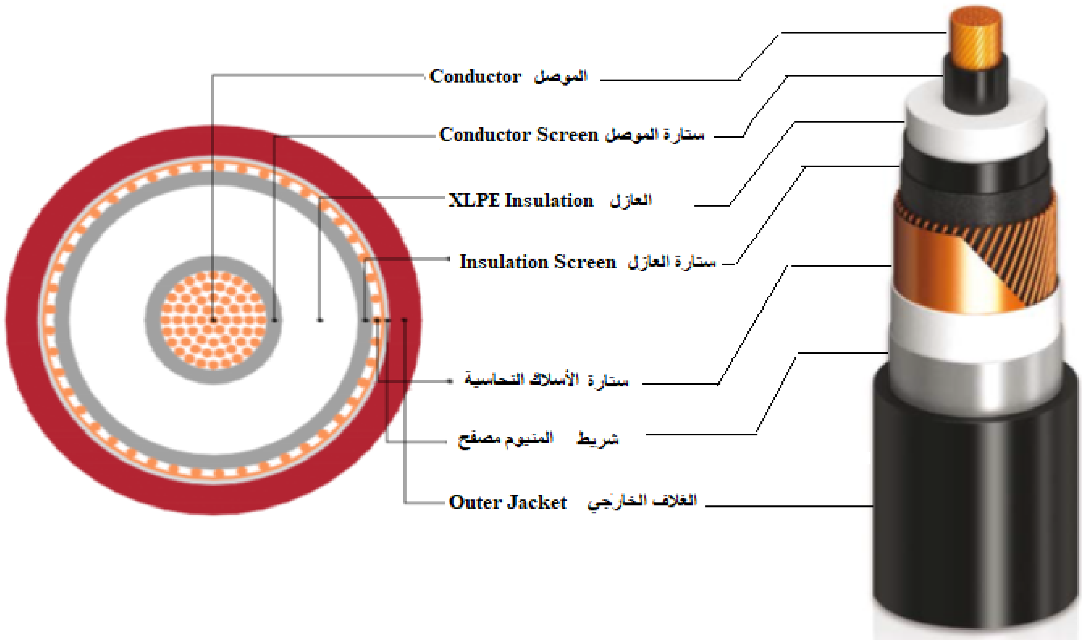
- تصريف التيار المتسعي الذي يمر خلال العازل.

- تصريف تيارات مركبة التتابع الصفري الناتجة عن أعطال الدائرة القصيرة كلياً أو جزئياً. و هذه لها علاقة باختيار حجم الستارة المعدنية نفسها.
- تدوير التيارات المحتثة بواسطة المجالات الكهربائية الناتجة عن الكيبلات التي تتجاور مع بعضها البعض.

وتصنع الستارات المعدنية على عدة أنواع تتلخص بالآتي:

(أ) الستارة المصنوعة من الأسلاك النحاسية

تمتاز هذه الستارة بخفة وزنها وكلفتها القليلة وتكون مناسبة للكيبلات التي تمد في الأنفاق والخنادق ومنظومات التأطير. كذلك فإن سعة تحملها لعطل الدائرة القصيرة عالٍ نوعاً ما إضافة إلى جعلها ضد نفاذ الماء بإضافة شريط فوقها من الألمنيوم الرقيق. الشكل 8-4.



الشكل 8- 4 ستارة الأسلاك النحاسية.

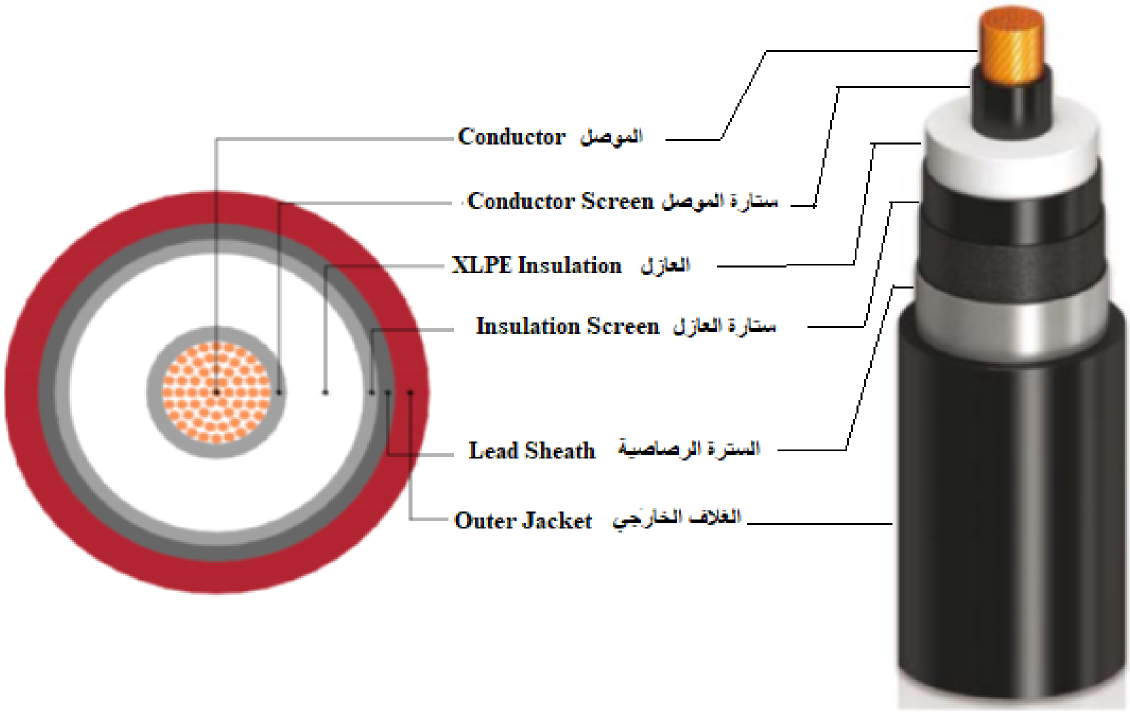
أما مساوئ الستارة المصنوعة من الأسلاك النحاسية فتكمن بالمقاومة المنخفضة التي تبديها للتيارات الدوارة مما يتطلب ربطها بصورة خاصة لغرض تخفيض الضياعات أو المفاقيد في الطاقة.

(ب) الستارة أو الغلاف المصنوع من سبائك الرصاص أو الرصاص المقذوف

Extruded Lead or Lead-Alloy Sheath

يمتاز الكيبل الحاوي على هذه الستارة بكونه ملائم لجميع أنواع طرق النصب والمد في التربة ويكون أيضا مقاوم لدخول الماء ويمتلك مقاومة عالية لذلك فإن مفاقيد الطاقة تكون بأدنى ما يمكن

إضافة إلى مقاومته العالية للتآكل. أما مساوئه فتكمن في وزنه الثقيل والكلفة العالية ولا يذهب عن البال أن مادة الرصاص هي مادة سامة وأما من الناحية الكهربائية فإن سعة تحمله لعطل الدائرة القصيرة محدودة، أنظر الشكل 8-5.



الشكل 8-5 كيبل بسترة مصنوعة من سبائك الرصاص أو الرصاص المقذوف .

(ت) الغلاف الرصاصي مع ستارة الأسلاك النحاسية

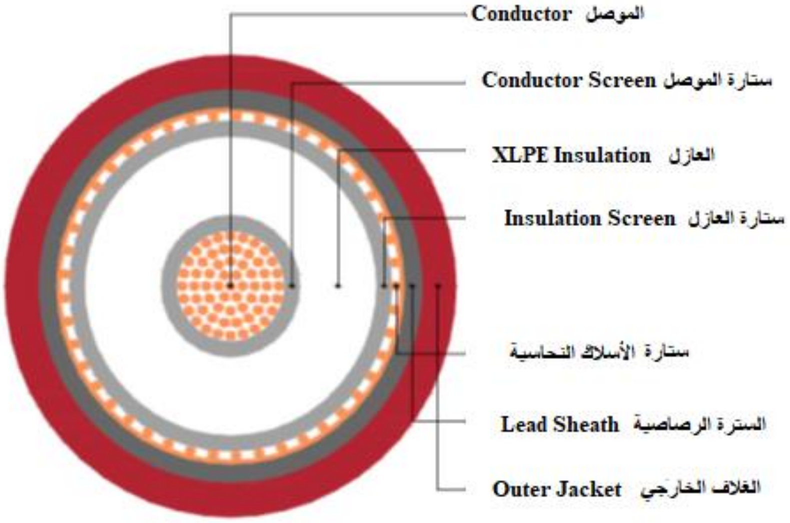
Lead Sheath with Copper Wire Screen

يمتاز الكيبل الحاوي على هذه الستارة بكونه ملائم لجميع أنواع النصب والمد في التربة ويكون أيضا مقاوم لدخول الماء ويمتلك مقاومة عالية لذلك فإن مفاقيد الطاقة تكون بأدنى ما يمكن، وسعة تحمله لعطل الدائرة القصيرة عالية بسبب وجود الستارة النحاسية حول الرصاص ويعد وصيل ممتاز للتأريض ومقاوم ممتاز للتآكل. أما مساوئه فتكمن في وزنه الثقيل والكلفة العالية ولا يذهب عن البال أن الرصاص هو مادة سامة. أنظر الشكل 8- 6.

(ث) السترة الخارجية الواقية المضادة للتآكل

إن الستارة المعدنية أو الأغلفة المعدنية الأخرى تتطلب حماية إضافية ضد الأضرار الميكانيكية وفوق كل ذلك الحماية من التآكل الذي يسببه الماء سوية مع المواد الألكتروليتية الفعالة الموجودة في التربة. عليه فالسترة الخارجية الواقية تؤمن الوظائف الحمائية التالية:

1- الحماية الميكانيكية: تؤمن السترة الخارجية قدراً من الحماية للب الكيبل من الأضرار الميكانيكية مثل الخدوش والضربات والانضغاط الجانبي التي تحدث خلال عملية المد والتركيب والنقل والتحميل.



الشكل 8-6 كيبل مصنوع له ستارة من الرصاص مع ستارة الأسلاك النحاسية.

2 - الحماية الكيميائية: تؤمن السترة الخارجية حماية اللب من المواد الكيميائية المتلفة.

3 - ترشيح أو فلترة الأيونات Ion Filtration: بينت الأبحاث أن كثير من الملوثات التي تدخل إلى العوازل الموجودة في الكيبل التي مصدرها التربة نفسها التي تحيط به. إلا أن السترة الخارجية على الرغم من كونها غير مصممة لهذا الغرض، إلا أنها ترشح قسم من هذه الأيونات عند نفاذ الرطوبة إلى داخل الكيبل. وكقاعدة عامة فإن قابلية السترة الخارجية للكيبل على ترشيح الأيونات تزداد كلما زاد سمك جدارها.

4- مقاومة التآكل Corrosion Resistance: بينت التجارب أن الدرع المعدني الواقي للكيبل الذي لا يحتوي على سترة خارجية سوف يتآكل لكثير من أنواع الترب. أما إذا أحتوى الكيبل على سترة خارجية فان التآكل سوف يقل بصورة كبيرة.

5- نفاذ الرطوبة Moisture Migration : نفاذ الرطوبة للكيبل تشكل معضلة كبيرة لتدهور العازل . السترة الخارجية تقلل من معدل نفاذ الرطوبة الى لب الكيبل .

6- الوظيفة الكهربائية: تؤمن السترة الخارجية وظيفة كهربائية مهمة جداً بتماسك مكونات الكيبل نفسه وترابطها البيني. فلأجل أن يعمل الكيبل بصورة جيدة وتجنب ظاهرة التآكل، فإن منظومة

الترابط البيني تتطلب أن الدرع المعدني والستارات المعدنية وكذلك التوصيلات يجب أن تكون جميعها معزولة عن جهد الأرض. وبما أن السترة الخارجية تحتوي على مواد بلاستيكية حرارية غير موصلة Thermoplastic التي يجب أن تكون متوافقة إما مع جميع عناصر الكيبل التي في تماس معها أو مع أقصى درجة حرارة اشتغال للموصل خلال الظروف الطبيعية أو الظروف الطارئة وظروف الدائرة القصيرة.

ويجب أن تحتوي السترة الخارجية على مادة متعدد كلوريد الفينيل PVC أو متعدد الأثيلين بأشكاله الأربعة (LDPE أو LLDPE أو MDPEأو HDPE) الملائمة لتعرضها لضوء الشمس . ويفضل استخدام متعدد الأثلين (البولي أثلين) على متعدد كلوريد الفينيل في صناعة الستر الخارجية للكيبلات لكون أن الأخير يتعرض للتدهور في خواصه عند مروره بدورات حرارية مطولة. أما السترات المصنوعة من البولي أثلين فتمتلك المحاسن الآتية مقارنة بمتعدد كلوريد الفينيل الـ PVC :

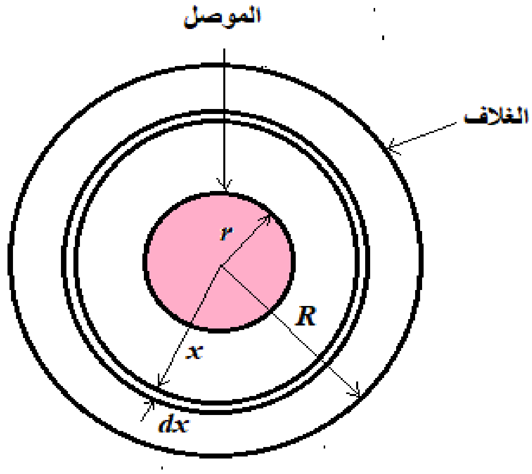
- لها خواص كهربائية وفيزيائية أفضل
- معدل انتقال بخار الماء أقل بكثير
- امتصاصها الماء أقل بكثير
- مقاومتها للضرر وصلابتها أفضل
- أخف في الوزن
- تؤدي إلى إطالة العمر التشغيلي للكيبل

8-5 حساب متسعة الكيبل أحادي اللب Capacitance of single-core cable

بما أن كيبلات الفولتية العالية يجب أن يكون لها غلاف معدني مؤرض فإن الفيض الكهربائي الذي يتواجد بين الموصل والغلاف هو وحده الذي سيتم أخذه بعين الاعتبار عند حساب متسعة الكيبل أساساً. فإذا كانت أقطار الموصل والغلاف هي r و R على التعاقب كما مبين في الشكل 8-7 وكانت الشحنة على سطح الموصل مقدارها Q كولومب لكل متر طول فإن كثافة الفيض الكهربائي يمكن إيجادها من قانون كولومب كما يأتي :

$$D_x = \frac{Q}{2\pi x} \qquad \text{كولومب/متر مربع}$$

المجال الكهربائي عند نصف القطر سيكون



الشكل8-7 مقطع لكيبل أحادي اللب.

$$E_x = \frac{Q}{2\pi x \epsilon_r \epsilon_0} V/m \qquad (8.1)$$

حيث أن ϵ_r هي السماحية النسبية لعازل الكيبل، و $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ هي سماحية الهواء.

ويمكن إيجاد فرق الجهد V بين الموصل والغلاف كالآتي:

$$V = \int_r^R E_x \, dx = \ln \frac{R}{r} \quad \text{فولت} \qquad (8.2)$$

والمتسعة بين اللب والغلاف تكون

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{ln\frac{R}{r}} \qquad (8.3)$$

المعادلة (8.3) يمكن أن تطبق أيضاً على أغلب الكيبلات ثلاثية اللب المستعملة لفولتيات أعلى من 11 كيلوفولت لكون أن لهذه الكيبلات شبكات معدنية تحيط بكل قلب أو لها غلاف منفصل لكل قلب أو وجود كليهما معاً. وإذا كان مقطع الموصل غير دائري كأن يكون بيضوياً مثلاً ففي هذه الحالة تعوض قيمة نصف القطر r في المعادلة (8.3) بكونه حاصل قسمة محيط الموصل نفسه على π2. وبالتعويض عن Q في (8.1) و (8.2) نستطيع إيجاد تدرج الفولتية عند نصف قطر x وكالآتي:

$$E_x = \frac{V}{x \, ln \, R/r} V/m \qquad (8.4)$$

ويكون أقصى إجهاد كهربائي على عازل الكيبل المعطى في المعادلة (8.4) أعلاه عندما تكون $x = r$. لذا فبالتعويض في المعادلة السالفة نحصل على

$$E_r = \frac{V}{r\,ln\,R/r} V/m$$

وإذ كان الموصل مجدولا غير مصمت عندئذ يزداد الإجهاد الكهربائي بنسبة تتراوح بين 15 إلى 25 % أكثر من هذه القيمة. وإذا أردنا إيجاد قيمة الإجهاد الكهربائي الدنيا عند سطح الموصل أي V/r فيجب أخذ مشتقة المعادلة أعلاه بالنسبة الى قطر الموصل ومساواتها بالصفر: $dE_r/dr = 0$ فنحصل على $ln\,R/r = 1$ أي أنه عند $R = 2.718\ r$ يكون الإجهاد بأدنى قيمته . وفائدة هذه النتيجة هي حساب كم يجب أن تكون أعلى قيمة لنصف القطر R (حجم الموصل) لقيمة معينة من الفولتية خاصة في الفولتيات العالية.

مما تجدر الإشارة اليه هو أن العازل في الكيبل يمكن أن يجهد كهربائياً لحدود تدرج الفولتية العاملة المصممة لكي يشتغل فيها عند سطح الموصل نفسه، لكن الإجهاد يقل كلما ابتعدنا عن الموصل. هذه النقطة المهمة تستدعي النظر بمحاولة تقليل كمية العازل عن طريق إعادة توزيع الإجهاد على العازل بحيث يزداد عند الطبقات الخارجية بدون أية زيادة عند سطح الموصل حيث يتم ذلك بطريقتين:

(أ) إستعمال مادتين عازلتين مختلفتين أو أكثر وتكون المادة العازلة التي تمتلك سماحية عالية قرب الموصل. (المعادلة 5.1). هذه الطريقة تسمى بتدرج السعة.

(ب) تدرج الأغلفة الداخلية: في هذه الطريقة يتم تقسيم المادة العازلة الى طبقتين أو أكثر باستعمال أغلفة معدنية داخلية رقيقة تغذى بجهد كهربائي مناسب عن طريق ربطها الى تفريعات على ملفات المحول المغذي للكيبل.

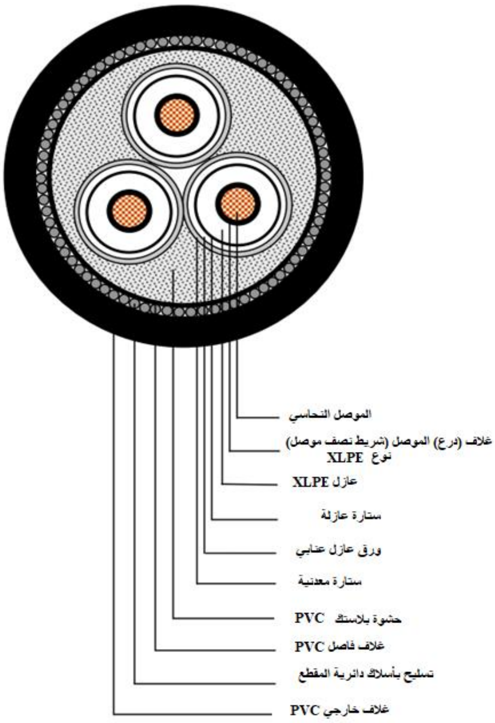
هذه الطريقة الثانية تتميز بصعوبتها العملية لذلك قلما تستخدم في الوقت الحاضر. من جهة أخرى يستخدم ورق خفيف قرب الموصل لزيادة المتانة الكهربائية في هذه المنطقة بدلاً من الطريقة الثانية.

8-6 حساب متسعة الكيبل المحزوم الثلاثي اللب Capacitance of 3-core Belt Cable

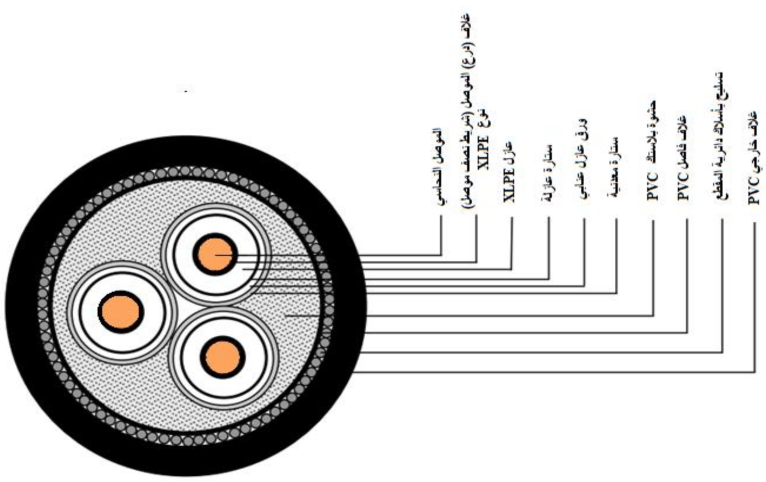
يتألف الكيبل الثلاثي المحزوم الثلاثي اللب من ثلاث موصلات نحاسية أو من الألمنيوم كما موضح في الشكل 8-8. الموصلات إما أن تكون مصمتة أو مجدولة حسب تصميمها، وعادة تستعمل الموصلات المجدولة لمساحات المقاطع الكبيرة والفولتيات العالية. أما الموصلات المصمتة فتستخدم للفولتيات المتوسطة والمقاطع العرضية الصغيرة.



الشكل 8-8 كيبل فولتية عالية من النوع الثلاثي الطور المحزوم.

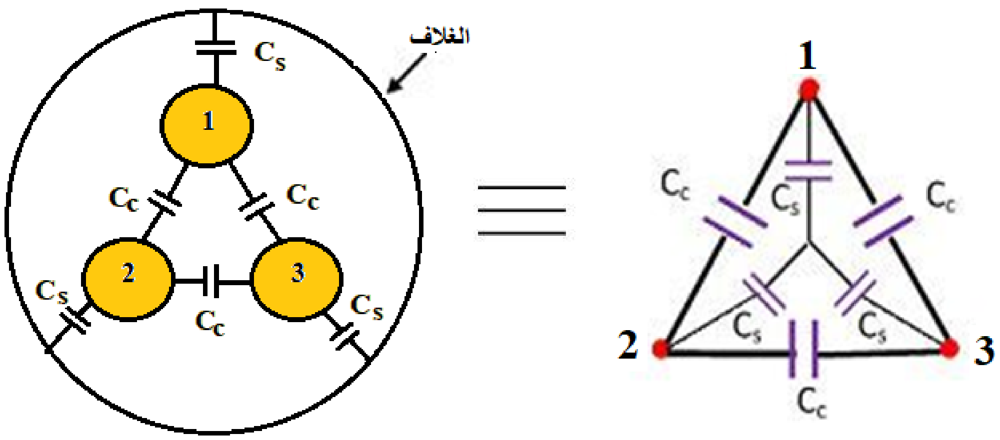


بالنسبة للكيبلات المعزولة بالورق والمغطاة بالرصاص PILC التي تستخدم في نقل وتوزيع الطاقة ويمكن تركيبها مكشوفة في مجاري تحت الأرض أو مدفونة مباشرةً ويبدأ تصميمها بموصلات نحاسية مكشوفة وملدنة قد تكون دائرية أو متحدة المركز أو مضغوطة أو مدمجة مجدولة. وأدى الجمع بين الخصائص الكهربائية والميكانيكية الممتازة للعازل الورقي المشبع بالزيت إلى عزل موثوق واقتصادي حيث يكون كل موصل ملفوف بالورق، وتملأ الفراغات بعد ذلك لتكوين مقطع دائري إضافة الى الحزام من العازل الورقي المحيط بالموصلات الثلاثة، الشكل 8-9. وقد يكون الغلاف الخارجي PVC أو PE.



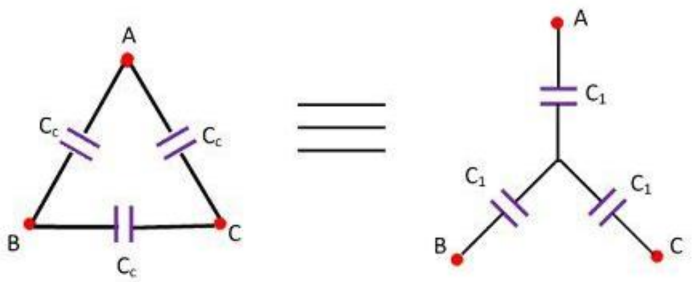
الشكل 8-9 مقطع لكيبل ثلاثي القلب محزوم.

لما كان مقطع الموصل غير دائري في الغالب وكذلك تكون الموصلات محاطة بعازل غير متجانس ذي خواص غير موحدة وسماحية ليست واحدة معلومة، فإن السعات C_c بين الموصلات الثلاثة والسعات بين الموصل الواحد والغلاف C_s من الصعب حسابها. ويتم الحصول عليها عادة بالقياسات المختبرية. أما المتسعات المؤثرة التي تمثل هذه السعات لكل متر فهي مبينة في الشكل 8-10.



الشكل 8- 10 السعات بين الموصلات والغلاف لكيبل ثلاثي القلب محزوم.

السعات C_c المربوطة بشكل مثلث يمكن ابدالها بثلاثة متسعات قيمة كل منها $3C_c$ مربوطة بشكل نجمي وذلك باستخدام تحويل مثلثي إلى نجمي المعروف (دلتا- ستار) وبذلك تكون قيمة السعة إلى المحايد إذا كان مؤرضاً هي : $C=(C_s+3C_c)$ ، أنظر الشكل 8- 11 .



الشكل 8-11 تحويل الربط من مثلي إلى نجمي (دلتا إلى ستار).

من الشكل 8-11 أعلاه:

المتسعات المربوطة بشكل مثلثي C_c يمكن أن تستبدل بمتسعات C_1 مربوطة بشكل نجمي وكالآتي:

المتسعة بين A و B في الربط المثلثي : $C_c + 0.5C_c = 1.5C_c$.

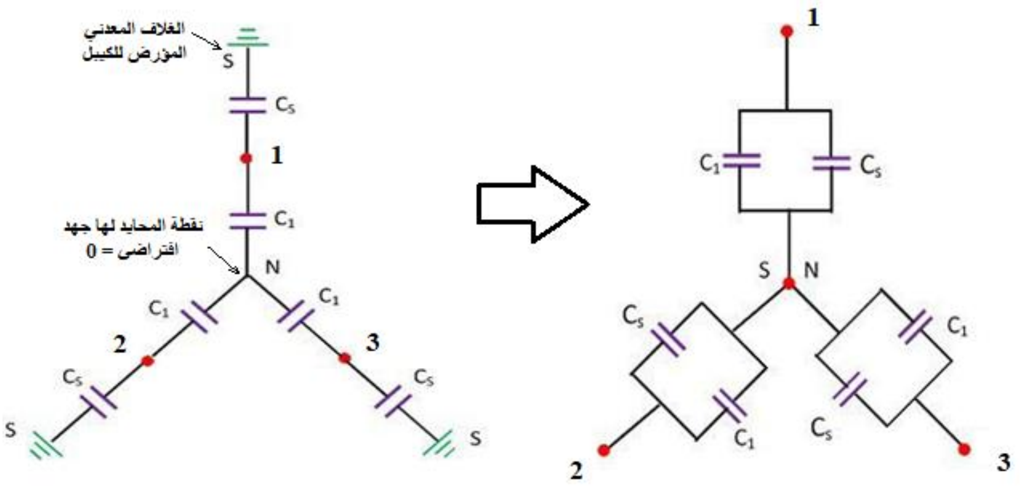
المتسعة بين A و B في الربط النجمي = $0.5C_1$

وللربطين كليهما: $0.5C_1 = 1.5C_c$

عليه فإن $C_1 = 3C_c$

إن فائدة إيجاد متسعات الكيبل هو لحساب تيار الشحن اللازم وكذلك حساب الخسائر والمفقودات في الطاقة أثناء نقلها بواسطة الكيبلات وكما يأتي :

إذا افترضنا أن نقطة المحايد في الربط النجمي مؤرضة تخيليا وكان الجهد الكهربائي للغلاف المعدني للكيبل صفراً فسوف تكون النقطتين N و S متساويتين في الجهد كما مبين في الشكل 8-12. ولما كانت C_1 و C_s مربوطتان على التوازي عليه يمكن جمعهما بمتسعه واحدة قيمتها ($C_1 + C_s$) .



الشكل 8- 12.

وتكون متسعة كل موصل الى المحايد أو المتسعة المكافئة هي: $C_0 = C_1 + C_s = 3C_c + C_s$

وإذا كانت فولتية الخط = V_L وفولتية الطور = V_p عليه فإن تيار الشحن يكون :

$$I_c = V_p \omega C_o \frac{V_L}{\sqrt{3}} \omega 3\ (C_c + C_s) A$$

والقدرة المتفاعلة اللازمة للشحن في الطور الواحد :

$$kVAr = V_p I_c \times 10^{-3}$$

القدرة المتفاعلة الكلية اللازمة للشن للأطوار الثلاثة :

$$kVAr_{\text{الكلية}} = 3V_p I_c \times 10^{-3}$$

وتجدر الملاحظة أن C_0 هي المتسعة بين أي موصل والستارة المعدنية لكيبل ثلاثي الموصل مزود بستارات.

8-7 حساب محاثة الكيبلات وحساب المفاعلة الحثية

لغرض حساب محاثة الكيبلات الأحادية والثلاثية اللب يمكن الرجوع الى المعادلتين (3.17) و (3.49) في الفصل الثالث وجعلهما أساساً لحساباتنا حيث أن هذه المعادلات يمكن أن تطبق فعلياً على كل موصل بعد أن يتم تحويرها إذا كان ذلك ضرورياً لتشمل الآتي:

(أ) النقص في قيمة المحاثة بسبب تأثير التقارن المشترك مع الغلاف، وهذا يمكن إهماله في الكيبلات ذات مساحة المقطع العرضي الكبيرة بصورة عامة.

(ب) الزيادة في المحاثة بسبب التقارن المشترك مع معادن التسليح للكيبلات الثلاثية القلب وهذه الزيادة يمكن أن تكون ضمن القيم 10% إلى 25% كأقصى حد.

(جـ) النقص في المحاثة الناجم عن المسافة القريبة بين الكيبلات التي فيها موصلات ذات مقاطع دائرية وبين تلك التي لها مقاطع مشكلة من قطاعات المناظرة لها.

8-8 حساب المقاومة المؤثرة للموصل

لغرض إيجاد المقاومة المؤثرة لكل موصل في كيبل والتي تسمى R_{eff} يجب تؤخذ العوامل التالية بعين الاعتبار: المقاومة التي يبديها الموصل عند تسليط تيار مستمر عليه (مقاومة التيار المستمر) عند درجة حرارة الاشتغال الطبيعية، التأثير القشري، تأثير التجاور (التقارب)، مفاقيد الغلاف وكذلك مفاقيد التسليح. هذه العوامل الخمسة تؤثر على حساب مقاومة الكيبل كالآتي:

مقاومة التيار المستمر: تعتمد قيمة هذه المقاومة على درجة الحرارة القصوى التي يعمل عندها الموصل والتي يتحملها العازل. بالنسبة للكيبلات المعزولة بالورق المضغوطة يجب أن لا تتعدى درجة حرارة الموصل 85 درجة مئوية، وبالنسبة للكيبلات المعزولة بالبلاستك نوع XLPE تكون 90 درجة مئوية.

التأثير القشري : وهو الزيادة في المقاومة بسبب التأثير القشري الذي يبديه الموصل، وهذا يعتمد على مساحة مقطعه العرضي .

تأثير الجوار (التقارب): تنشأ الزيادة في مقاومة الموصل بتأثير التقارب بين الكيبلات المتجاورة نتيجة لعدم انتظام كثافة التيار على مقطع الموصل بسبب تأثير الفيض المغناطيسي الآتي من موصلات الأطوار الأخرى. وتكون هذه الزيادة أكبر في الكيبلات الأحادية الموصل منها في الكيبلات الثلاثية الموصل المحزومة .

مفاقيد الغلاف : إذا لم تكن الأغلفة المعدنية لكيبلات أحادية الموصل مربوطة كهربائيا مع بعضها فسوف تتولد فولتية محتثة بين غلاف وآخر نتيجة الحث المغناطيسي بين الموصلات والأغلفة. وتعتمد قيمة هذه

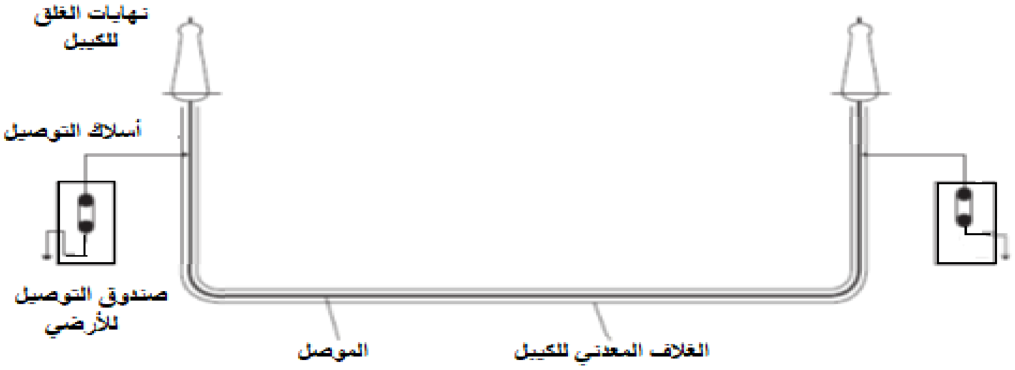
الفولتية على المباعدة (المسافة بين الكيبلات) وقد تصل في بعض الأحيان إلى 100 فولت /كم/1000 أمبير يجري في الموصلات. هذه الفولتيات سوف تكون خطرة على الأشخاص والمعدات وتزيد من المفاقيد بسبب توليدها لتيارات دوارة، أي انها تؤدي إلى زيادة فعلية في مقاومة الموصل، وسنشرح في الفقرة التالية طريقة التقليل من تأثيرها بواسطة تأريض أغلفة الكيبل .

مفاقيد التسليح: إن المفاقيد التي تنشأ بسبب التيارات الدوامة والتخلفية في شرائط التسليح الفولاذي قد تكون أكثر من المفاقيد في الغلاف الرصاصي بحيث قد تصل الى 20% تقريباً في بعض الكيبلات الثلاثية الموصل. وبصورة عامة تكون مفاقيد التسليح أكثر بالكيبلات أحادية الموصل لذلك لا يفضل استخدام التسليح في مثل هذه الكيبلات في أغلب الأحيان.

8-9 تأريض الغلاف المعدني للكيبل Metallic Screens Earthing

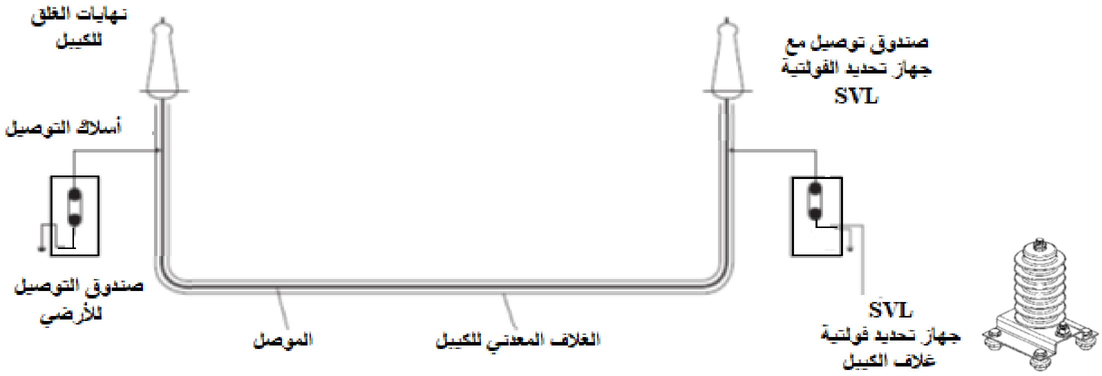
عندما يمر تيار متناوب في موصل كيبل فسوف تحتث فولتية في الستارة المعدنية تتناسب مع التيار نفسه والمسافة بين الأطوار وكذلك طول الخط. ونهاية الكيبل غير المؤرضة سوف تتعرض الى هذه الفولتية وربما تصل قيمها إلى عشرات الفولت بحيث تكون خطرة على الأشخاص والمعدات ويجب أن تتم السيطرة عليها بالطرق التالية:

1- طريقة الربط بالأرضي من جهتي الكيبل: تتم في هذه الطريقة ربط الغلاف المعدني للكيبل بالأرضي من جهتيه كما موضح في الشكل 8-13 بحيث لا تحدث أية فولتية تذكر على نهايتي الكيبل وبذلك تزول المخاطر المذكورة آنفاً. من ناحية أخرى تؤدي هذه الطريقة حدوث تيارات دوارة تتناسب قيمها مع التيار المار في الموصل وبذلك يقلل من سعة حمل التيار للكيبل نفسه.



الشكل 8- 13 تأريض الكيبل من بدايته ونهايته (الصورة لطور واحد من الكيبل).

2- طريقة الربط بالأرضي من جهة واحدة من الكيبل: تتم في هذه الطريقة ربط الغلاف المعدني للكيبل من جهة واحدة للأرضي بحيث أن الجهة الأخرى المفتوحة تظهر عليها الفولتية المحتثة التي تزداد بصورة خطية كلما اقتربنا من الجهة غير المؤرضة، أنظر الشكل 8-14.



الشكل 8-14 تأريض الكيبل من جهة واحدة مع استخدام جهاز تحديد الفولتية من الجهة الأخرى (الصورة لطور واحد من الكيبل).

ولضمان السلامة وعامل الأمان يستخدم جهاز تحديد الفولتية في هذه الجهة المفتوحة وهو عبارة عن مانعة التمور (ضد تصاعد الفولتية) Surge arrester (SVL) لكي يتم تجنب صعود الفولتية في حالات العطل.

8- 10 إختيار طريقة الترتيب والمد للكيبلات (ترتيب المنظومة)

Choice of System Configuration of Cable Installation

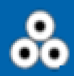
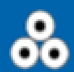
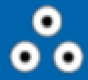
يقصد بترتيب المنظومة هو ترتيب أو تنسيق الأطوار الثلاثة لمنظومة كيبلات نسبة إلى أحدهما الى الآخر. والتمييز الرئيسي هو بين الترتيب المسطح المنبسط وبين التصميم الثلاثي للكيبلات. مع هاتان المنظومتان يجب إعطاء الأهمية القصوى لكل من المسافة بين محاور الأطوار ونوعية غلاف الكيبل وفوق كل ذلك حالات التأريض. ترتيب المنظومة له تأثير كل من مفاقيد الكيبلات المعتمدة على التيار من خلال تأثير التقارب والفولتية المحتثة في الأغلفة إضافة الى التداخل المغناطيسي مع الخطوط الأرضية الأخرى. كذلك فان التبديد الحراري يعتمد على الترتيب الى حد ما. باختصار فإن النقاط الأساسية التي تؤثر على أداء الكيبل من خلال ترتيب المنظومة تتلخص بالخصائص التشغيلية الأربعة وكما يأتي:

- مفاقيد الموصل بسبب تأثير التقارب
- مفاقيد الغلاف بسبب التيارات المحتثة
- تبديد الحرارة الى التربة المحيطة

- التداخل المغناطيسي مع مكونات البيئة المحيطة

ويوضح الجدول 8-1 إجراء التغيير في مواضع وترتيب مد الكيبلات على الخصائص التشغيلية الأربعة المذكورة في أعلاه.

الجدول 8-1 .

تغيير الترتيب	التأثير على التداخل	التأثير على تبديد الحرارة	التأثير على مفاقيد الغلاف	التأثير على تأثير التقارب
 بدلاً من 	مفضل	غير مفضل	مفضل	غير مفضل
 بدلاً من 	مفضل	مفضل	غير مفضل	مفضل
 بدلاً من 	مفضل	لايوجد فرق	ـــــ	ـــــ
تأريض من جهتين بدلاً من تأريض من جهة واحدة	مفضل	ـــــ	غيرمفضل	ـــــ

8-11 الانهيار في عوازل الكيبلات

في البداية يجب أن نفهم أن سبب انهيار العازل في كيبلات نقل القدرة الكهربائية هو التفريغ الكهربائي. والتفريغ الكهربائي هو انتقال طاقة الإلكترونات بين موصلين اثنين بينهما فرق جهد كهربائي. وعندما يتدهور أداء المادة العازلة، يتولد انتقال للطاقة الإلكترونية بين الموصلين المذكورين. وقد يكون التفريغ كلياً أو جزئياً حيث يعد التفرغ الجزئي حالة خاصة يحدث غالباً في كيبلات نقل الطاقة الكهربائية وهو على نوعين رئيسيين:

1- عندما يكون هناك عيب أو ضرر في مادة عازلة بين موصلين كأن تكون هناك شوائب، فجوات هوائية، شذب في الموصل نفسه ....الخ فإن المجال الكهربائي للعازل سوف يتغير منتجاً تفريغ في العازل على شكل نبضات . بسبب ثابت العزل النسبي للفجوات الهوائية يكون أصغر بكثير من ثابت العزل النسبي للعازل للكيبل فان الفجوة سوف يقع على عاتقها حمل فعل شدة المجال الكهربائي الكبير الناجم عن الفولتية ذات التردد 50 هرتز بذلك سوف تحدث عشرات الملايين من التفريغات التي من شأنها أن توسع الفجوات وبالتالي تؤدي الى انهيار تام في العازل. الحالة نفسها تحدث للشوائب إذا كانت موجودة في العازل لأن ثابت العزل النسبي للشوائب هو أصغر من ذلك الذي للعازل وبفعل المجال الكهربائي سوف يحدث التفريغ في الشوائب أولاً ويتم توليد غازات وكربنة وفجوات هوائية تؤدي إلى التفريغ الجزئي. أما الندب والشذب في الموصل فإنها تؤدي إلى التفريغ الجزئي ذلك لأن الندب والشذب تزيد من قوة شدة المجال الكهربائي.

والعازل الذي يكون حول الندب سوف يحدث فيه تفريغ أول الأمر يتطور إلى انهيار الذي يسمى عادة بالتأثير الندبي Tip effect .

2- التفريغ الخارجي الذي يطلق عليه ظاهرة الكورونا هو نوع من أنواع التفريغ الجزئي. فإذا كان الهواء هو العازل بين خط الجهد العالي والأرض وعندما يتركز المجال الكهربائي حول الموصل خاصة في نقطة معينة كعقد السلك فانه سيحث تفريغ نبضي في الهواء نفسه لكنه لا يسبب قصر دائرة إلى الأرض وانما يسبب ظاهرة الكورونا.

عموماً يكون للتفريغ الجزئي خصائص التفريغ العادي لكن طاقة الإلكترونات المرتحلة بسببه قليلة، والمادة العازلة بين القطبين قد لا تنشأ قوساً كهربائياً الذي بمجرد أن يظهر يفاقم مجرى القوس الناجم عن التفريغ الجزئي هذا إلى أن يتم إنشاء عموده تماماً وبذلك يحصل عطل قصر الدائرة في النهاية.

كيبلات الفولتية العالية سواء كانت تحت الأرض أو تحت الماء التي تستخدم في الوقت الحاضر لنقل الطاقة الكهربائية في أكثر دول العالم تستخدم عوازل البولميرات لكون أن هذه العوازل تمتاز بمحاسن متعددة مثل عدم حاجتها للصيانة مقارنة بالكيبلات التي مع العازل الورقي المشبع بالزيت. والمعروف أن العازل يعطى له الأهمية البالغة في منظومات الفولتية العالية حيث يؤدي إخفاقه إلى انهيار المنظومة بأكملها. لذلك من الضروري فهم تصرف العازل تحت ظروف إجهاد مختلفة. لقد اجمع باحثون كثيرون في هذا المجال على أن أسباب الانهيار في العازل يحدث نتيجة للإجهاد الكهربائي والإجهاد الحراري كل على حدة أو كليهما معا وهو ما تتعرض له كيبلات الفولتية العالية في الغالب في الحياة العملية.

قد يحدث الانهيار في عازل الكيبل نتيجة لعدم توفر استقراريه حرارية ضمن العازل، وهذه ناتجة عن المفاقيد التي يسببها تيار الشحن للكيبل الذي في الغالب يكون متقدماً بزاوية 90 درجة تقريباً. أما بخصوص تيار التوصيل الذي يجري في العازل نفسه فيكون قليل جداً بحيث يسبب فقدان قدرة قليل.

لأغلب الكيبلات يكون جيب تمام الزاوية المحصورة بين الفولتية وتيار الشحن صغير جداً ويجب أن يكون كذلك لأنه لو كان كبيراً سيسبب فقدان كبير في القدرة وسترتفع درجة حرارة العازل T بصورة محسوسة وإذا استمرت الحرارة بالزيادة فسوف يؤدي ذلك الى تلف العازل. يحدث ذلك لأن زيادة درجة الحرارة تسبب زيادة في القدرة المبددة في العازل والتي تؤدي مرة أخرى الى ارتفاع إضافي في درجة الحرارة. هذا التأثير سيكون تراكمياً ما لم يكون هناك تبديد في الحرارة مساوياً لمعدل توليدها أو يفوقه. عادة تكون عوامل القدرة في الكيبلات الحديثة منخفضة جداً بحيث أن عدم الإستقرارية الحرارية لا تحدث تحت ظروف الاشتغال الاعتيادي.

8-12 الاعتبارات الحرارية وتقنين التيار الكيبلات

يتم مد الكيبلات إما مباشرة في الأرض أو توضع في خنادق أو تسحب في قنوات؛ إلا أن الطريقة الأولى وهي الطمر في الأرض هي المفضلة في كل الأحول إن كان ذلك ممكناً لكونها أسهل وأرخص وتبديد حرارة الكيبل فيها أفضل. وإذا كان هناك أكثر من كيبل واحد في خندق التمديد الأرضي فيجب وضعهما بحيث تكون هناك مسافة فاصلة بين الكيبلين لا تقل عن 30 سنتمتراً لغرض الحد من الحرارة المتبادلة بينهما وكذلك تجنب تأثير تيارات القصر في أحد الكيبلين على الآخر في حالات حدوث الأعطال.

إن تحديد قابلية حمل التيار للكيبل يحددها مقدار الحرارة المتبددة، أي أن التيار المقنن لكيبل معين في درجة حرارة التي يسمح أن يشتغل الكيبل ضمنها هي محددة. لما كانت الحرارة المتولدة في الموصلات الثلاثة لكيبل ثلاثي القلب بطول متر واحد وكل موصل يحمل تيار مقداره I أمبير هي بالواط: $P = 3$ $I^2 R_{ac}$ ، وهذه تكون مساوية في حالة الاستقرار إلى الحرارة المتبددة على طول عازل الكيبل في حالة كونه ممدد في الأرض مباشرة.

إذا قمنا بتعريف المقاومة الحرارية كونها تلك المقاومة التي تحتاج لفرق درجة حرارة مقدارها درجة مئوية واحدة لكي تسبب توليد حرارة مقدارها 1 واط، أي أن هناك تشابه بين جريان الحرارة وجريان التيار الكهربائي لذلك تتوافق وحداتها مع وحدات قانون أوم وتقاس عادة بالأوم الحراري وهو درجة الحرارة C^o مقسوم على الواط (C^o/W) . ولما كان تعاملنا مع الكيبلات في قياس المحاثات والمتسعات والمقاومات لكل كيلومتر أو متر طول فالمقاومة الحرارية ممكن أن تقاس بوحدة الطول وهي المقاومية الحرارية لعازل الكيبل وهي مشابهه للمقاومية الكهربائية ووحدة قياسها هي $(C^o\ m\ /W)$.

الآن إذا كان ارتفاع درجة حرارة موصل في حالة الاستقرار فوق درجة الحرارة المحيطة هو T_c درجة مئوية ، وكانت Gc و Gg هما المقاومتان الحراريتان (أو الأومات الحرارية لكل متر طول من الكيبل) بين الموصل والسطح الخارجي للكيبل وبين الأخير وسطح الأرض على التعاقب عندئذ يمكن تمثيل القدرة المفقودة في الموصلات بدلالة الفقد الحراري وكالآتي:

$$P = 3\ I^2 R_{ac} = T_c\ / (Gc+Gg) \qquad (8.5)$$

ويمكن تحوير المعادلة أعلاه عند الضرورة لكي تشمل مصادر الحرارة الأخرى مثل الأغلفة والتسليح والعازل نفسه والأجزاء المناظرة الأخرى للمقاومات الحرارية التي تجري الحرارة خلالها لكي تستعمل في حساب تقنين التيار. واذا تم تخمين المقاومات الحرارية لكيبل أحادي القلب يمكن عندئذ استعمال المعادلة التالية لنحصل على قيمة Gc :

$$Gc = (g_1/2\pi l)\ln (R/r) \quad \text{أوم حراري/متر} \qquad (8.6)$$

حيث g_1 هي المقاومية الحرارية لعازل الكيبل وهذه يمكن أن تأخذ قيمة بحدود 5.5 أوم . متر حراري (أي 550 W/ cm C^o ، حيث يفضل قياسها بالسنتمتر بدل المتر) لأغلب كيبلات نقل الطاقة للفولتية العالية . وفي حالة الكيبل ذي الموصلات الثلاثة تكون $Gc =1/3 (g_1/2\pi)$.

ولكي يتم حساب قيمةG_g يفرض في هذه الحالة أن الأرض لها مقاومية حرارية ثابتة g_2 مقدارها

120 W/ cm C^o تقريباً ، لكنه في الواقع هذه القيمة تكون غير ثابتة وتتغير حسب نوع التربة. فمثلاً تتغير من 60 W/ cm C^o للتربة ذات الطين الرطب إلى 300 W/ cm C^o إلى التربة ذات الرمل الجاف وهذا الاختلاف يؤثر بصورة كبيرة على سعة حمل التيار للكيبل بحيث تصبح قيمتها الى النصف لدرجة حرارة قصوى مقدارها 85 مئوية . وبما أن حرارة الكيبل سوف تجعل التربة المحيطة تجف بمرور الزمن فان g_2 ستزيد قيمتها موقعياً.

من الناحية العملية لا يمكن تمثيل العمليات الفيزيائية التي تحدث للكيبلات المطمورة في الأرض بصورة دقيقة ومثالية، وتبقى الخبرة في هذا المجال هي المعين لترفدنا بتحديد الحسابات المفصلة في مثل هذه الأمور. هذه الخبرة موجودة في البحوث المنشورة وأدلة الشركات المصنعة وكذلك الكتب التخصصية التي يجب الرجوع اليها وإلا فإن الهدف من المعادلات المعطاة هنا ماهي إلا لتوضيح المبادئ الأساسية فقط.

ولإيجاد قيمة G_g فإذا كان لدينا كيبل مفرد نصف قطره الخارجي R_e مدفون بعمق d متر تحت سطح الأرض في تربة لها مقاومية ثابتة g_2 فسوف يكون المجال الحراري مشابها تماماً للمجال الكهربائي الذي ينشأ بين موصل لخط هوائي مفرد ومستوى سطح الأرض. عليه تكون قيمة Gg تعطى بالمعادلة الآتية:

$$Gg = (g_2/2\pi l)\ln (2d/R_e) \quad \text{أوم حراري} \qquad (8.\ 7)$$

من هذه التحليلات نلاحظ أنه لو تغير g_2 بمقدار 50 فسوف يحدث تغيير في سعة نقل التيار للكيبل بحدود 10 إلى 30% . أما إذا ازداد عمق الدفن d من 1 متر إلى 2 متر فإن سعة حمل التيار (تقنين الكيبل) سوف تقل بحوالي 5% فقط .

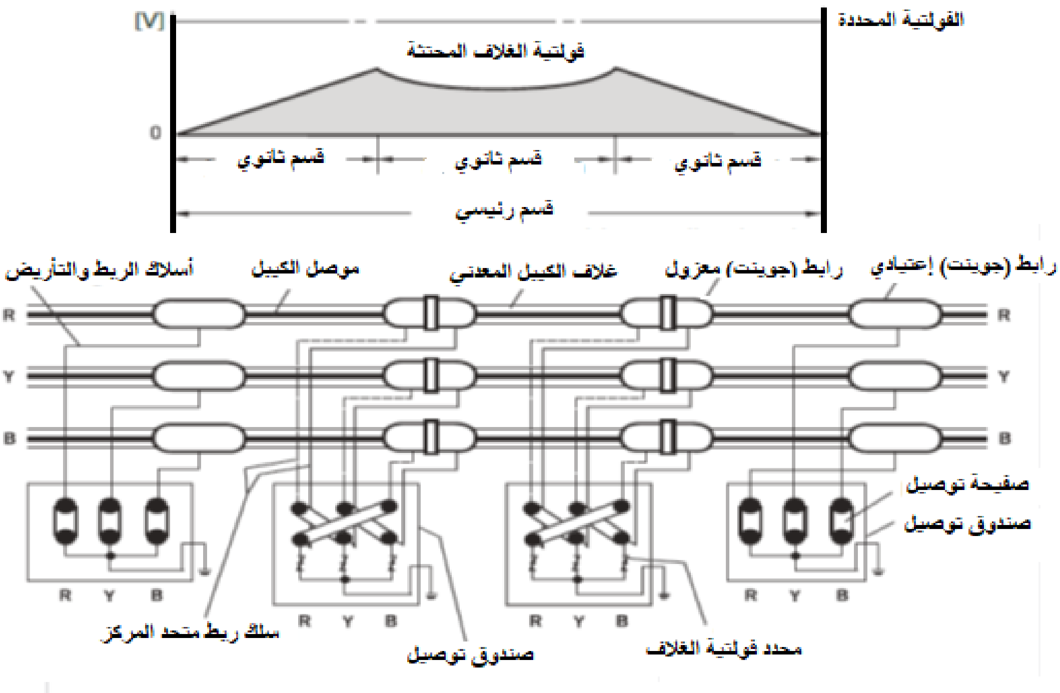
التحليلات أعلاه كانت لكيبل مفرد موضوع داخل خندق مستقل، أما اذا تم مد أكثر من كيبل داخل الخندق نفسه فإن التأثيرات الحرارية للكيبلات الأخرى يجب أن تؤخذ بالحساب. لذلك يكون حساب تقنين التيار للكيبلات في هذه الحالة أكثر تعقيداً، ونتائج مثل هذه الحسابات متوفرة في جداول خاصة لسعات حمل التيار لأنواع الكيبلات مع العوامل الأخرى المؤثرة على التقنين.

لكي تزاد سعة حمل التيار للكيبلات هناك عدة طرق تحت الدراسة لتحسين تبريد الكيبلات المطمورة في الأرض للفولتية العالية لأكثر من 275 كيلو فولت شملت مد أنابيب منفصلة تحمل ماء قرب الكيبلات

وبذلك يتم تبريد الكيبل والسماح للكيبلات المتعددة في خندق واحد أن تمد قريبة من بعضها بحيث أن أبعاد وكلفة الخنادق ستنخفض مما يجعل اختيار المسار أكثر سهولة. ومن المشاريع الأخرى كذلك مد الكيبل داخل مواسير يتم تغطيسها مع الكيبل في الماء وكذلك مشاريع تصنيع الكيبلات الفائقة التوصيل التي تنعدم فيها المقاومة الكهربائية نتيجة التبريد الفائق للموصل.

من الطرق الأخرى أيضاً لزيادة سعة حمل التيار للكيبلات هي طريقة الربط المتقاطع Cross Bonding. هذه الطريقة يتم فيها محاولة معادلة الفولتية المحتثة الكلية في غلاف كيبل مفرد أحادي الموصل وذلك لتقليل المفاقيد نتيجة التيارات الدوارة في غلاف الكيبل وزيادة تقنين التيار له.

الصيغة البسيطة لهذه الطريقة هي تقسيم الكيبل إلى ثلاثة أقسام ثانوية متساوية الطول مع توصيل تقاطعي لأغلفة كل قسم من هذه الأقسام الثانوية. وتعد كل ثلاثة أقسام من الأقسام الثانوية قسماً رئيسياً واحداً بحيث يتم فيه ربط الأغلفة مع بعضها وتأريضها في الوقت نفسه، أنظر الشكل 8-15.



الشكل 8- 15 نظام الربط المتقاطع للكيبلات المفردة.

الفصل التاسع
حماية خطوط نقل القدرة الكهربائية – الأساسيات
TRANSMISSION LINES PROTECTION- FUNDAMENTALS

1-9 مقدمة

إن الحلقات الأربعة التي تتضمنها أنظمة القدرة الكهربائية المتمثلة بالتوليد والنقل والتوزيع والاستخدام تحتاج إلى جهود كبيرة ومتنوعة وتكاليف باهظة الثمن في تشغيلها وادامتها، إضافة إلى الجهود المبذولة في الدراسات والتخطيط للوصول إلى أفضل الخدمات المقدمة للمستهلكين الكبار والصغار من مستخدمي الطاقة الكهربائية.

والنظام الكهربائي المتكامل بما يحتويه من معدات كهربائية مختلفة كالمولدات والمحولات وخطوط النقل يتعرض لحوادث غير طبيعية تسمى بالأعطال، فعندما تتعرض منظومة قدرة كهربائية لعطل ما (أو أي ظرف آخر غير طبيعي) فإن ذلك العطل يجب أن يزال بأسرع وقت من جميع الأجزاء المكهربة الأخرى لسببين رئيسيين:

1- تقليل التلف في نقطة العطل ومنع حدوث الحرائق والانفجارات أو الارتفاع المفرط لدرجات حرارة الأجهزة والمعدات المعرضة للعطل.

2- استعادة استقراريه المنظومة وضمان استمرار تجهيز الطاقة الكهربائية للدوائر والأجهزة والمعدات الأخرى وعدم قطعها بالكامل.

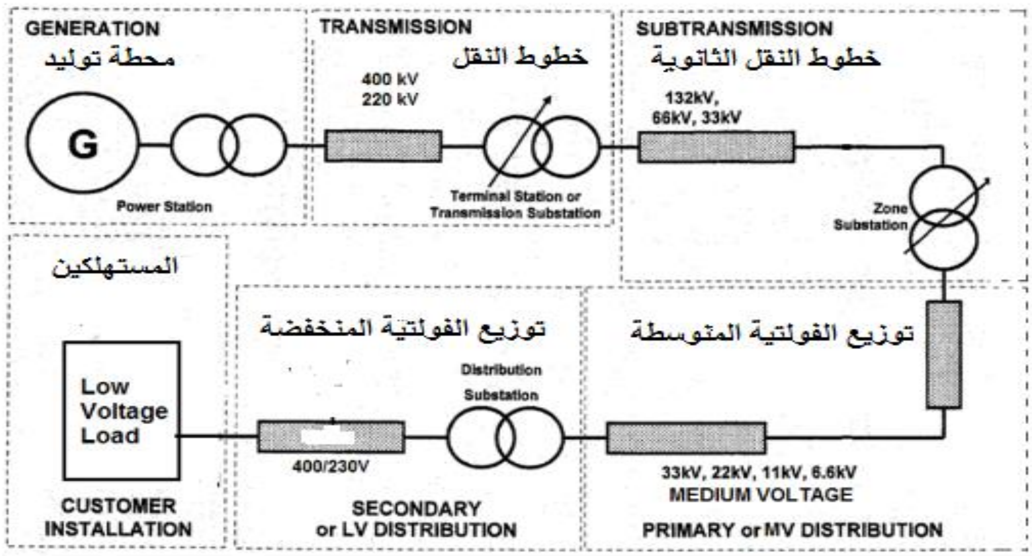
2-9 أساسيات حماية أنظمة القدرة الكهربائية

تعرف الحماية الكهربائية بأنها التقنية أو العلم الذي يبحث في اكتشاف وجود العطل والمبادرة في التشغيل الصحيح لوسائل الحماية، سواء كانت قواطع دائرة أو مصاهر مصممة لهذا الغرض. وقد أدى الاستخدام المتزايد للطاقة الكهربائية في مختلف مرافق الحياة إلى جعل وسائل الحماية في منظومات القدرة والوثوق التام في اشتغالها من المسائل ذات الاهتمام الكبير.

3-9 مكونات نظام القدرة

يتألف نظام القدرة بصورة عامة من نظام رئيسي ومنظومات ثانوية وكالآتي:

(1) النظام الرئيسي: يتكون من العناصر الأساسية لتوليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربائية بدأ من محطة التوليد وصولاً إلى المستهلكين وكما موضح في الشكل (9-1).



الشكل 9-1: النظام الرئيسي في منظومة قدرة نمو جية.

(2) المنظومات الثانوية: تعرف المنظومات الثانوية كونها المنظومات المساعدة التي ليس لها علاقة بالتوليد والنقل والتوزيع أي المنظومات الرئيسية المذكورة سلفا حيث يمكن ادراجها كما يأتي:

1) منظومة الحماية.
2) منظومات التحكم التلقائي في الفولتية والتردد وتدفق الطاقة وكذلك تعويض الطاقة المتفاعلة.
3) منظومات قياس استهلاك الطاقة الكهربائية والتحكم التشغيلي وتسجيل البيانات الإحصائية.
4) منظومات التحكم عن بعد عبر منظومة روابط الاتصالات SCADA.
5) منظومات التحكم اليدوي المحلي الخاصة بدعم الطاقة المتفاعلة على مستويات الجهد ضمن تكوين الشبكة.
6) مراقبة حالة الاجهزة (درجة الحرارة، وجود العطل وغيرها).
7) البنية التحتية للاتصالات الخاصة بمنظومة القدرة.
8) أجهزة التحويل - محولات التيار ومحولات الفولتية.

4-9 الحماية ضد الأعطال Faults والظروف غير الطبيعية Abnormal conditions

تتعرض أنظمة القدرة عادة الى أعطال أو ظروف غير طبيعية تؤدي إلى توقفها أو التسبب بعطبها وكما يأتي:

1-4-9الأعطال:

إن الأعطال الرئيسية التي تحدث في النظام الكهربائي قد تكون أعطال كهربائية مثل الدوائر القصيرة والأعطال الناجمة عن الحمل الزائد. وتحدث أعطال الدائرة القصيرة بطرق متعددة، بما في ذلك تدهور وفشل العوازل نتيجة تقادم الزمن عليها أو بسبب ارتفاع درجة الحرارة أو الرطوبة الزائدة وتراكم الغبار (التلوث). إضافة إلى ضربات الصواعق وعمليات الغلق والفتح المفاجئة. كذلك الأضرار الميكانيكية التي تتعرض لها معدات التوزيع الكهربائية بسبب القوى الميكانيكية الناجمة عن التيارات العالية أو التصادم مع اجسام غريبة وتلف معدات الاستخدام نتيجة للحمل الزائد أو انهيار وسط التبريد أو غيره من أشكال سوء الاستخدام أو عيوب في التصميم أو اخطاء في التصنيع أو أخطاء عند التركيب.

انواع الأعطال:

تقسم الأعطال في الخطوط والمعدات الكهربائية المكونة لنظام القدرة إلى نوعين أساسيين:

1- أعطال نتيجة فتح أو انقطاع واحد من الخطوط الناقلة أو أكثر Open faults.

2- اعطال نتيجة قصر دائرة كهربائي Short circuit يحدث بين طور واحد أو أكثر مع الأرض أو بين طورين أو أكثر بدون الأرض .

والأعطال من النوع الأول لا تسبب تيارات عالية القيمة تمر في الدائرة لذلك يمكن لبعض الأحمال، على سبيل المثال الأحمال أحادية الطور، أن تستمر ولكن الأحمال الثلاثية الطور يجب ان تقطع عنها التغذية حيث لابد للمرحلات أن تشعر بوجود العطل. أما الأعطال من النوع الثاني فينتج عنها في الغالب تيارات عالية القيمة ويكون لها التأثير الحراري والميكانيكي على مكونات الشبكة.

قد تحدث أعطال الدائرة القصيرة بين موصلين اثنين (ثنائية الطور)، أو بين جميع موصلات النظام المتعدد الطور، أو بين طور واحد أو أكثر باتصالها بالأرض، وقد تكون الدائرة القصيرة بسبب جسم موصل صلب (ثابت) وفي هذه الحالة تكون الدائرة القصيرة دائمية ولها مقاومة منخفضة نسبيًا. وبصورة عامة يمكن تلخيص أنواع الأعطال الرئيسية في نظام القدرة كما يأتي:

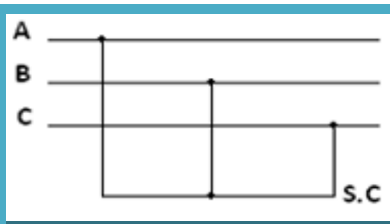
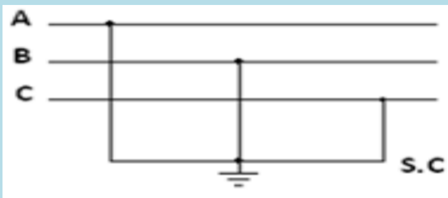
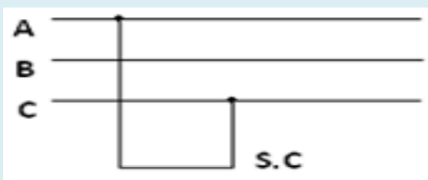
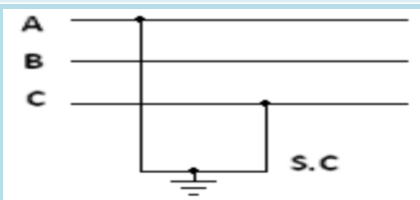
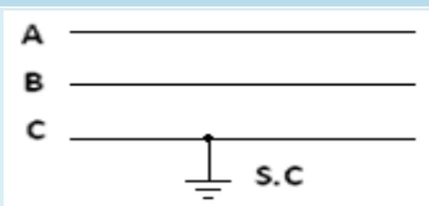
1) أعطال الدائرة القصيرة (3Φ، 3Φ g، 2 Φ ، Φ g، 2 Φ g)

2) أعطال الدائرة المفتوحة (الموصل المفتوح)

3) الأعطال المركبة المعقدة (بين الدوائر الكهربائية أو الشبكات المختلفة)

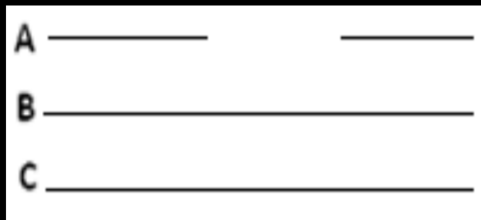
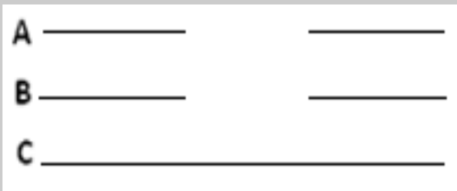
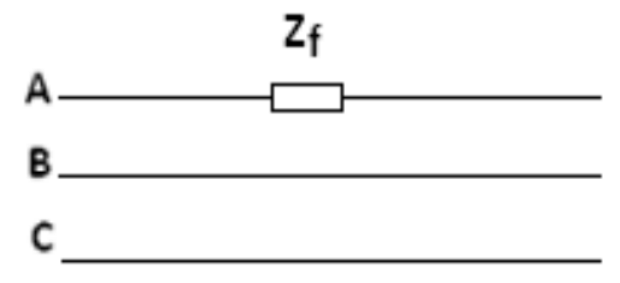
4) أعطال داخلية في الملفات للمولدات والمحولات والمحركات

ويبين الشكل (9- 2) انواع الأعطال الشائعة في الأنظمة الكهربائية.

عطل بسبب حدوث قصر بين ثلاثة أطوار3Φ	
عطل بسبب حدوث قصر بين ثلاثة أطوار مع الأرضg3Φ	
عطل بسبب حدوث قصر بين طورين Φ 2	
عطل بسبب حدوث قصر بين طورين مع الأرض g Φ 2	
عطل بسبب حدوث قصر بين طورواحد مع الأرض g Φ	

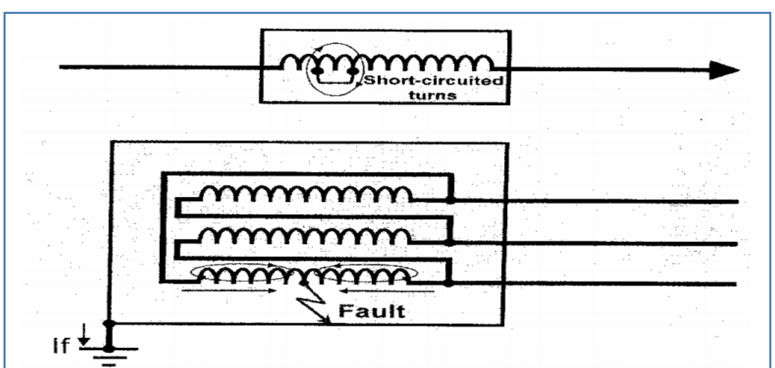
الشكل 9-2 انواع الأعطال الشائعة في الأنظمة الكهربائية.

كما يبين الشكل 9- 3 أنواع أعطال الدائرة المفتوحة.

	**عطل بسبب حدوث قطع في طور واحد**
	**عطل بسبب حدوث قطع في طورين**
	**عطل خلال ممانعة كبيرة في طور واحد**

الشكل 9-3 أنواع أعطال الدائرة المفتوحة.

ويبين الشكل 9- 4 الأعطال الداخلية في اللفات وملفات المولدات والمحولات.



الشكل 9-4 عطل بسبب حدوث قصر بين أحد لفات محول أو أحد الأطوار في المحول مع جسم المحول المؤرض.

وقد بينت الدراسات التي أجريت في العديد من الدول أن الإحصاءات لاحتمال حدوث الأعطال كنسبة مئوية لأنواع أعطال الدائرة القصيرة لخطوط النقل هي:

- عطل أحادي الطور مع الأرض: 70 - 80 ٪
- عطل طور مع طور مع الأرض: 17 - 10 ٪
- عطل طور مع طور: 10 - 8 ٪
- عطل ثلاث أطوار: 3 - 2 ٪

وتتلخص أسباب حدوث أعطال الدائرة القصيرة بالآتي:

1) انهيار العازل
2) الطيور والحيوانات التي تلامس وتجسر العوازل
3) الحفريات التي تؤدي إلى تلف الكابلات تحت الأرض
4) انهيار الأعمدة الناقلة للطاقة
5) التكسر بالموصلات الناقلة
6) اصطدام المركبات والسيارات بأبراج نقل الطاقة
7) المخلفات التي تحملها الرياح وترميها على الأسلاك المكهربة
8) العمليات التشغيلية المغلوطة التي تنفذ من قبل العاملين

إن تبعات ونتائج حدوث الأعطال تختلف وتتشعب وتشمل:

آثار أعطال النوع الأول:

- بالنسبة لأعطال فتح أو انقطاع الخطوط الناقلة فإن قيم فولتيات النظام سوف يحصل فيها اختلاف عن مستويات الفولتية الطبيعية والمقبولة مما يؤدي لاحتمالية حدوث تلف بالمعدات.
- بعض أجزاء النظام سوف تتصرف كما لو كانت نظم ثلاثية الأطوار غير متزنة وهذا يعني تشغيل المعدات بطريقة غير سليمة.

أما الآثار الناجمة عن أعطال الدائرة القصيرة فتشمل:

- تدفق تيارات كبيرة أو كبيرة جدًا عبر أجزاء من الشبكة حيث يمكن أن تصل قيمها إلى آلاف أو عشرات الآلاف من الأمبيرات.

- لا يمكن السماح لهذه التيارات الكبيرة إلا بالتدفق لفترة زمنية قصيرة للغاية، وإلا فإن المعدات والمولدات ستتعرض للتلف، حيث تتراوح فترة التدفق المسموح بها خلال عطل الدائرة القصيرة بين 10 ميلي ثانية و 3 ثوانٍ.
- قد يسبب تأثير التسخين الناجم عن التيارات ذات الدائرة القصيرة في نشوب حرائق تشمل الممتلكات الشخصية والعامة.
- يمكن أن تحدث القوى الميكانيكية الكبيرة جدًا الناجمة عن تيارات الدائرة القصيرة دمار كبير وتلف للمعدات والاجهزة والأبنية المحيطة.
- قد "يهرب" التيار الكهربائي من موصلات الشبكة ويتدفق عبر مسارات يمكن أن تسبب خطراً على الأشخاص أو الحيوانات ويسبب أضراراً بالممتلكات بصورة عامة.

2-4-9 الظروف غير الطبيعية

الظروف غير الطبيعية التي قد يتعرض لها أي نظام قدرة كهربائي تشمل:

1) الانخفاض أو الزيادة في التردد
2) الحمل الزائد وارتفاع درجة الحرارة بسبب التشغيل المفرط
3) الزيادة أو الانخفاض في الفولتية
4) زيادة الدفق أو الفيض المغناطيسي في محولات القدرة
5) التشغيل غير المتزامن للآلات المتزامنة
6) العيوب والأعطال الميكانيكية

في ضوء ما جاء في أعلاه فإن أية منظومة حماية يجب أن يحدد أداءها وفق المتطلبات التالية:

- التمييز بين الحمل الاعتيادي وظروف عطل (حمل غير طبيعي)
- يجب عدم الخلط بين تقلبات الحمل وبين الظروف العابرة غير الضارة
- أن تكون انتقائية وقابلة التنسيق مع أنظمة الحماية الأخرى
- أن تكون لها سرعة كافية لمنع الضرر والمخاطر ـ ولكن ليست سريعة جداً
- ليس لديها "مناطق عمياء"، أي مناطق غير محمية
- يجب أن تكون ذات درجة عالية من الوثوقية وتكون متاحة للعمل في كل الأوقات عند الطلب
- يجب أن تكون أمينة ضد التشغيل غير الصحيح من قبل اشخاص غير مخولين (الأمان)

- يجب ألا تؤثر على تقنيات المعدات والأجهزة المحمية وسعاتها التشغيلية
- ينبغي أن تكون أسعارها معقولة

5-9 تفسير مصطلحات الحماية Explanation of Protective Terms

التمييز: يقصد بالتمييز القدرة على تمييز العطل في المناطق المختلفة، حيث يتم التفريق بين عطل داخلي في منطقة ما وعطل خارجي (خلالي) في أية منطقة أخرى. عليه فإن جهاز الحماية يجب أن يشتغل ويفصل للعطل الداخلي فقط وألا يشتغل للعطل الخارجي. كذلك فإن الحماية يجب ألا تفصل لأي تيار حمل.

حماية الوحدة: ويقصد بحماية الوحدة هي حماية وحدة واحدة مستقلة أما أن تكون مولد واحد مثلاً أو محول أو خط نقل متكامل من بدايته إلى نهايته وتكون بتصميمها الافتراضي ذاتية التمييز.

الحماية الرئيسية: هي تلك المنظومة التي يتوقع أن تشتغل عموماً عند حدوث عطل داخلي.

الحماية الساندة: وهي منظومة حماية ثانية (تكون عادة أرخص وأبطأ) تقوم بالحماية عندما تفشل منظومة الحماية الرئيسة عن أداء عملها. وتكون ملامسات الإعتاق للمرحلات لكلا المنظومتين الرئيسية والساندة مربوطة على التوازي. أن الفشل في إظهار وعزل العطل يمكن أن يكون بسبب بعض الأجزاء المشتركة بين المنظومتين (ومثال على ذلك قاطع الدائرة) وعليه فإن معظم المشاريع الحمائية تجهز بحماية ساندة لإزالة العطل بقاطع دائرة آخر.

الحماية الاختبارية: هي منظومة حماية تكون ملامسات الإعتاق للمرحلات فيها مربوطة على التوالي مع تلك التي في المنظومة الرئيسية وبذلك تحرس ضد الاغفال في التشغيل في أي من المنظومتين، ومنظومة الحماية الاختبارية هذه تستخدم في الأماكن التي لا يمكن أن يسمح فيها لأي سوء تشغيل في أجهزة الحماية. مثل قضبان التوزيع لمحطة توليد رئيسية.

الحساسية: يقال عن منظومة حماية بأنها حساسة عندما تشتغل لتيار عطل داخلي صغير جداً. ويحدث هذا عندما ينقطع موصل خط علوي معلق ويقع على أرض جافة أو أسيجة. فحينئذ يكون تيار العطل صغير جداً، حيث من الصعب عموما تأمين حماية كافية تتحسس التيار وتكشف ظروف هذا العطل.

الاستقرارية: يقال عن منظومة حماية ما أنها مستقرة عندما لا تعمل عند وجود تيار عطل خارجي كبير. ويجب على المنظومة أن تكون مستقرة لحد بلوغ تيار العطل الأقصى المسموح بمروره خلال المنطقة. والمواصفات النموذجية قد تتطلب استقرارية إلى حد 20 مرة بقدر التيار الإبتدائي المقنن لمحول التيار. أن حد الاستقرارية الإسمية يعطى بدلالة قيمة ج. م. ت لمركبة تيار العطل الخارجي المتماثلة. ومصطلحا الاستقرارية والحساسية هما تعبيران نسبيان. حيث يمكن لمنظومة حماية أن تكون حساسة جداً ولكنها غير

مستقرة بصورة كافية، أي من الوجهة المثالية يجب أن تكون المنظومة حساسة جداً ومستقرة جداً (لحدود معقولة)، لكن عادة ما تكون ظروف تحقيق هاتين الحالتين المثاليتين متضاربة.

الكمية المميزة: هي تلك الكمية التي تميز عمل المرحل، ومثال على ذلك التيار لمرحل التيار الزائد. والزمن لمرحل مؤخر التوقيت للتشغيل فكلاهما يعتبران كميات مميزة للمرحلات.

كمية الإمداد بالطاقة: هي التيار والفولتية أو أي منهما التي عندما تسلط على مرحل ما تجعله في حالة اشتغال.

القيمة المقننة: هي قيمة كمية الامداد والمؤشرة على لوحة التسمية والتي يعتمد عليها اسلوب أداء المرحل وفي حالة المرحل الذي يعمل بالتيار. فإن تياره المقنن يكون اعتيادياً التيار المقنن للثانوي في محول التيار الذي يستعمل مع المرحل (وهذا يعني أما 1 أمبير أو 5 أمبير).

قيمة الضبط (التنظيم) Setting value: وهي القيمة أو القيم الاسمية المؤشرة على مزولة المرحل (وتكون عادة نسبة مئوية من القيمة المقننة) التي يصمم المرحل للاشتغال عندها (مثال على ذلك 40% من 5 أمبير) ولما كان مرحل الحماية ومحول التيار التابع له لا يمكن النظر في أي منهما بمعزل عن الآخر، فإن تنظيم منظومة الحماية غالباً ما يؤشر على أنه نسبة من التيار المقنن لابتدائي محول التيار نفسه. أن منظومة القدرة يجب أن تكون مصممة وعاملة بحيث أن تيار العطل الأدنى الذي يحدث في أي منطقة يكون في الأقل ضعف تنظيم الحماية في تلك المنطقة. لبعض المرحلات (التي تعمل لدخل ثابت من الفولت أمبير في جميع تنظيمات التيار ومثال على ذلك مرحلات نوع (I.D.M.T.L) فإن أقل تنظيم تيار المرحل يناظر أقصى قيمة لممانعة المرحل نفسه وهذه الممانعة هي العبء على ثانوي محول التيار. عليه فإن تنظيم تيار المرحل الأدنى قد يسبب في تشبع الأجزاء الحديدية لمحول التيار مغناطيسياً. لذلك فليس من الضروري أن ينتج تنظيم تيار المرحل الأدنى أقل تنظيم لتيار العطل بدلالة التيار الابتدائي لمحول التيار نفسه.

قيمة اللقطة (الاشتغال)Pick-up value: هي أقل قيمة ممكنة لكمية الامداد التي تكون كافية لجعل المرحل يلتقط (أي يغلق ملامساته). ولمرحل مثالي فإن قيمة اللقط وقيمة التنظيم تكونان متساويتين.

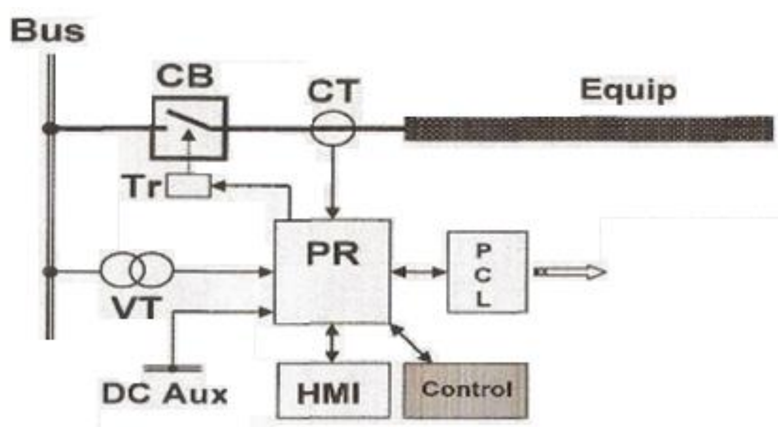
زمن التشغيل: هو الزمن الذي يكون بين وضع قيمة معينة للكمية المميزة (5 أمثال التنظيم مثلاً) واشتغال المرحل نفسه.

قيمة إعادة الضبط (الإسقاط) Reset value: هي أعلى قيمة لكمية الإمداد التي تكون على حد الكفاية لإبقاء ملامسات المرحل مغلقة بعد حصول عملية التشغيل والمرحل الجيد هو الذي له نسبة إسقاط / اللقط أقل جزئيا من الواحد (وكذلك زمن إعادة تنظيم صغير عندما تزداد كمية الامداد).

إن منظومات الحماية ذات التدرج الزمني (اللاوحدية) Time-Graded Protective Systems تتألف من أجهزة حماية متعددة. وكل جهاز منصوب في نقطة معينة وفي فترات على مسار منظومة قدرة شعاعية (تتغذى من طرف واحد مثل خط نقل شعاعي) وأن هذه الأجهزة تكون غير مربوطة فيما بينها كهربائيا. فإذا حدث عطل على منظومة القدرة فإن كل جهاز من هذه الأجهزة سوف يحمل التيار نفسه. ولكن المعضلة هي في الحصول على تمييز صحيح بين هذه الاجهزة. يكون الحل بضبط ازمان اشتغالها بتدرج زمني، بحيث أن الجهاز الأقرب لمكان العطل والمربوط على جانب مصدر الطاقة منه، يزيل العطل قبل اشتغال أي من الأجهزة الباقية. أن منظومات الحماية المتدرجة الزمن تستخدم كثيراً في منظومات التوزيع للضغط المنخفض 415/ 240 فولت على شكل مصاهر وقواطع دائرة صغيرة MCBs.

6-9 المكونات الأساسية لنظام حماية تقليدي

يتألف أي نظام حماية بسيط كما موضح في الشكل 9-5 من الأجزاء الرئيسية التالية:



الشكل9-5: الأجزاء الأساسية لنظام حماية بسيط.

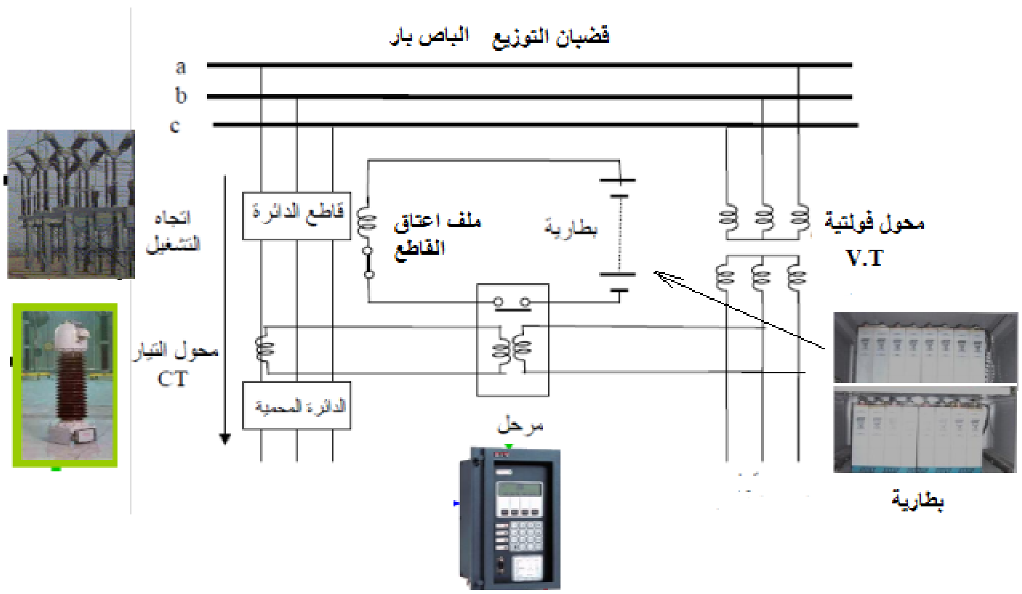
1- مرحل الحماية PR
2- قاطع الدائرة CB
3- الدائرة أو الجهاز المحمي Equip
4- محول التيار CT
5- محول الفولتية VT

6- مصدر الفولتية المستمرة   DC

7- شاشة التعامل بين الانسان والآلة HMI

8- رابط اتصالات PCL

هذه المكونات او العناصر يمكن اظهارها بصورة أوضح في الشكل 9-6:



الشكل 9-6: عناصر نظام الحماية.

9-6-1 مرحل الحماية Protective Relay

المرحل هو جهاز يراقب ويتعرف على أية ظروف تشغيل غير عادية في الدائرة وذلك من خلال قياس الكميات الكهربائية (تيار - فولتية - تردد - زاوية الطور) التى تختلف قيمها عند حدوث الأعطال في الدائرة الكهربائية. ويتم توصيل المرحلات بالدوائر الثانوية لمحولات القياس وعندما يستكشف المرحل وجود عطل ما يقوم بغلق دائرة ملف اعتاق قاطع الدائرة الذي يقوم بدوره بفتح الدائرة الكهربائية. ويعمل المرحل على اكتشاف الظروف غير الطبيعية ضمن المناطق المحددة له، ويقوم بفصل المنطقة المتأثرة بالعطل فقط وذلك لتجنب حدوث خطر مميت للأشخاص أو تدمير للمعدات. عليه فان المرحل يعد الدماغ الكهربائي لمنظومة الحماية حيث اختصاراً يقوم بوظيفتين أساسيتين:

- المراقبة والقياس

- ارسال الأمر أو الأشارة بفتح وتشغيل أو تقييد عمل القاطع

وبموجب الوظيفة يمكن ان تكون المرحلات كما ياتي :

- المرحلات الأساسية Primary Relays : وهي المرحلات التي يتم توصيلها مباشرة بالدائرة المحمية.
- المرحلات الثانوية Secondary Relays : وهي المرحلات التي يتم توصيلها إلى الدائرة المحمية عن طريق محول تيار أو محول فولتية أو كليهما.

ويبين الشكل 9-7 المخطط الوظيفي لمرحل حمائي مثالي . ويكون الدمار والعطب جسيمان عند عدم اشتغال المرحل بصورة صحيحة كما هو موضح في الصور المبينة في الشكل 9-8.

2-6-9 المتطلبات الأساسية لمنظومات الحماية والمرحلات

بالنظر للنتائج غير المرغوب فيها المتوقع حدوثها خلال حدوث الأعطال في انظمة القدرة، فان منظومات الحماية يجب أن يتم تصميمها بحيث تحقق عدد من المتطلبات الهامة التالية**:**

1- الوثوقية Reliability: للحكم على نظام وقاية بأنه نظام موثوق فيه (معتمد عليه) عندما يشمل كل من:

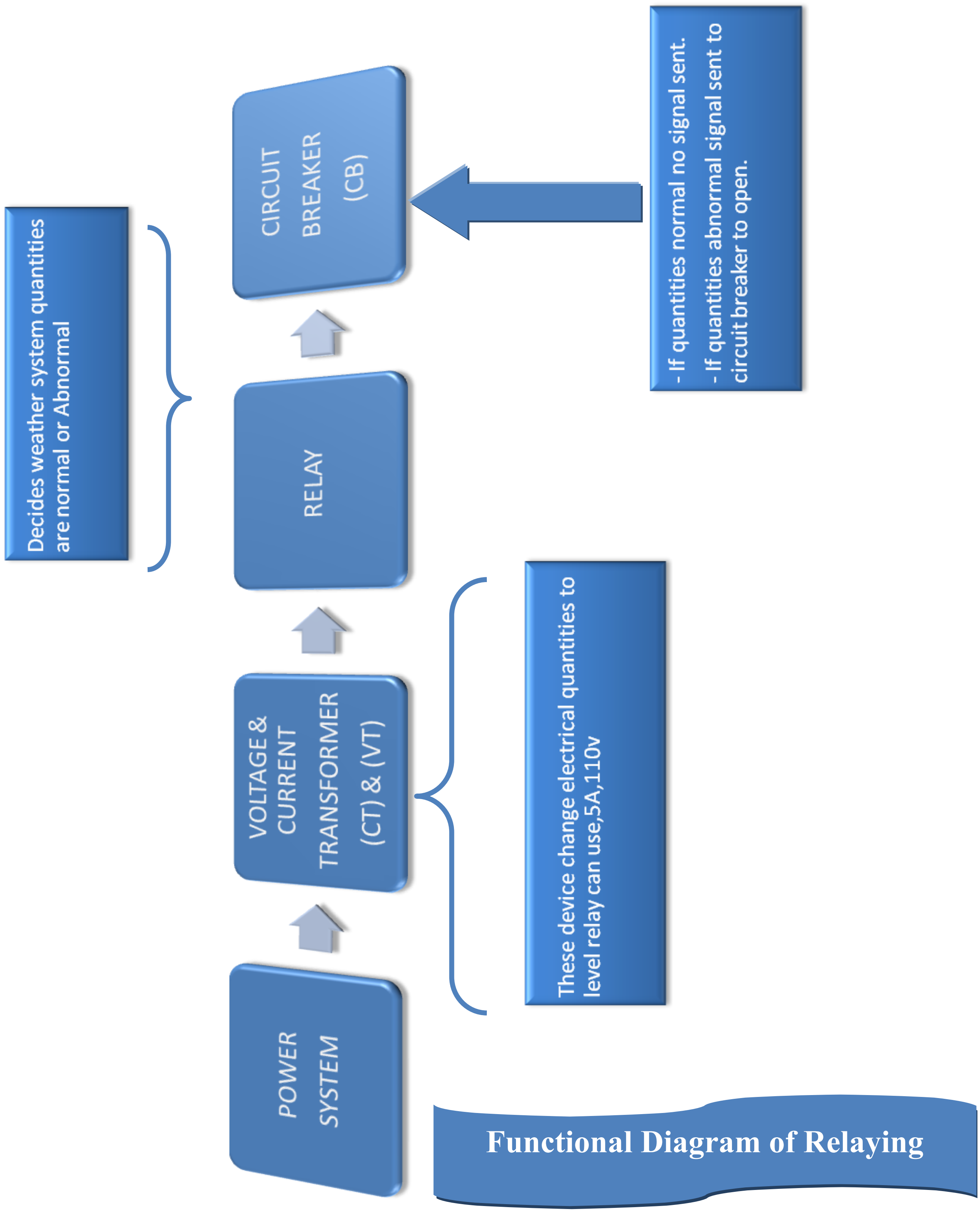
* ضمان تصرف النظام بطريقة صحيحة خلال الأعطال وهو ما يطلق عليه الثقة.

* ضمان عدم تشغيل نظام الوقاية في حالة عدم الحاجة وهو ما يطلق عليه الأمان وهذا يعني أن الاعتمادية على نظام الوقاية تتحقق عندما يتصرف بطريقة سليمة تحت ظروف النظم غير الملائمة والظروف البيئية المحيطة.

2- الســرعة Speed: يجب أن تستجيب المرحلات للظروف غير الطبيعية في أقل وقت ممكن، وهذا يعني أن زمن التشغيل يجب ألا يتجاوز الثلاث دورات Three cycles في المنظومات التي تعمل بترد الـ 60 هرتزمثلاً.

3- الانتقائية Selectivity : نظام الوقاية يجب أن يعطي أعلى استمرارية ممكنة للخدمة مع أقل فصل ممكن لنظام القدرة وذلك بقدرته على التمييز بين العطل في المنطقة المحمية والعطل في مكان آخر من المنظومة الكهربائية لغرض عزل المنطقة المعرضة للعطل فقط والإبقاء على باقي أجزاء الشبكة مجهزة بالطاقة.

الشكل9-7 المخطط الوظيفي لمرحل حمائي مثالي.



الشكل9-7 المخطط الوظيفي لمرحل حمائي مثالي.

الشكل 9-8 يكون الدمار كبيراً عند فشل اشتغال المرحل.

4- بسيط واقتصادي Simplicity and Economy : الاحتياج إلى كون النظام بسيط واقتصادي هو متطلب شائع في أي تصميم هندسي وبالتالي في نظم الحماية .

5- الحساسيةSensitivity: أن يعمل المرحل طبقاً للتحسس بأقل قيمة ضبط ويتجاوب مع الأعطال التي تحدث في المنطقة المحمية ذاتها.

9-6-3 تصنيف المرحلات

تصنف مرحلات الحماية عادة وفقًا للوظيفة التي تقوم بها أو وفقا لبنائها والإشارة الواردة اليها أو نوع الحماية التي تقوم بها وكالآتي:

1- التصنيف بموجب الوظيفة العامة:***General function***

- مرحل ثانوي Auxiliary
- مرحل حماية Protection
- مرحل مراقبة Monitoring
- مرحل سيطرة وتحكم Control

2- التصنيف بموجب بنية أو تركيب المرحل: ***Construction***

- المرحلات الكهرومغناطيسية Electromagnetic
- المرحلات الاستاتيكية Static relays

- المرحلات المحوسبة Computerized relays
- المرحلات الكهروديناميكية Electro - dynamic relays
- المرحلات الكهروحرارية Electro- thermal relays
- المرحلات غير الكهربائية (الحرارة، الضغط ....الخ)

3- التصنيف وفق الإشارة الواردة للمرحل: ***Incoming signal***

- مرحلات التيارCurrent relays : وتعمل عند قيمة محددة للتيار وتشمل مرحلات زيادة التيار(فوق التيار) ومرحلات نقص التيار (تحت التيار)
- مرحلات الفولتية Voltage relays: وتعمل عند قيمة محددة للفولتية وتشمل مرحلات زيادة الفولتية ومرحلات نقص الفولتية
- مرحلات القدرة Power relays : وتعمل عند قيمة محددة للقدرة وتشمل مرحلات زيادة القدرة ومرحلات نقص القدرة
- مرحــلات التـــردد Frequency relays: وتعمل عند قيمة محددة للتردد وتشمل مرحلات زيادة التردد ومرحلات نقص التردد
- مرحلات الحـــرارة Temperature relays : وتعمل عند قيمة محددة لدرجة الحرارة خلال الجزء المحمي

4- التصنيف وفق نوع الحماية ***Type of protection:***

- مرحلات التيارالزائد أو التيار الفوقي Overcurrent
- مرحلات التيار الزائد الأتجاهية Directional over current
- المرحلات المسافية Distance
- مرحلات زيادة الفولتية أو الفولتية الفوقية Overvoltage
- المرحلات التفاضلية Differential
- محلات القدرة العكسية Reverse power

7-9 أنواع المرحلات

بموجب التصنيف رقم (2) في الفقرة السابقة ، تنقسم المرحلات الرئيسية شائعة الاستخدام في حماية الأنظمة الكهربائية طبقًا لتركيبها وبنيتها إلى:

1) المرحلات الكهرومغناطيسية Electromagnetic relays

وتكون هذه المرحلات على نوعين رئيسيين:

أ- مرحلات الجذب المغناطيسي Magnetic attraction type

ب- مرحلات الحث المغناطيسي Magnetic Induction type

2) المرحلات الستاتيكية Static relays

وهي المرحلات التي تستخدم تكنولوجيا الحالة الصلبة Solid State كالترانزستورات والثايرستورات والمقاومات والمتسعات والدوائر المتكاملة وغيرها.

3) مرحلات الحاسوب Computer relays

وتكون مرحلات الحاسوب على نوعين:

أ - المرحلات الرقمية Digital relays

ب - المرحلات العددية Numerical relays

ويبين الشكل 9-9 مخططا لأنواع المرحلات المستخدمة في مجال حماية أنظمة القدرة وخطوط النقل.

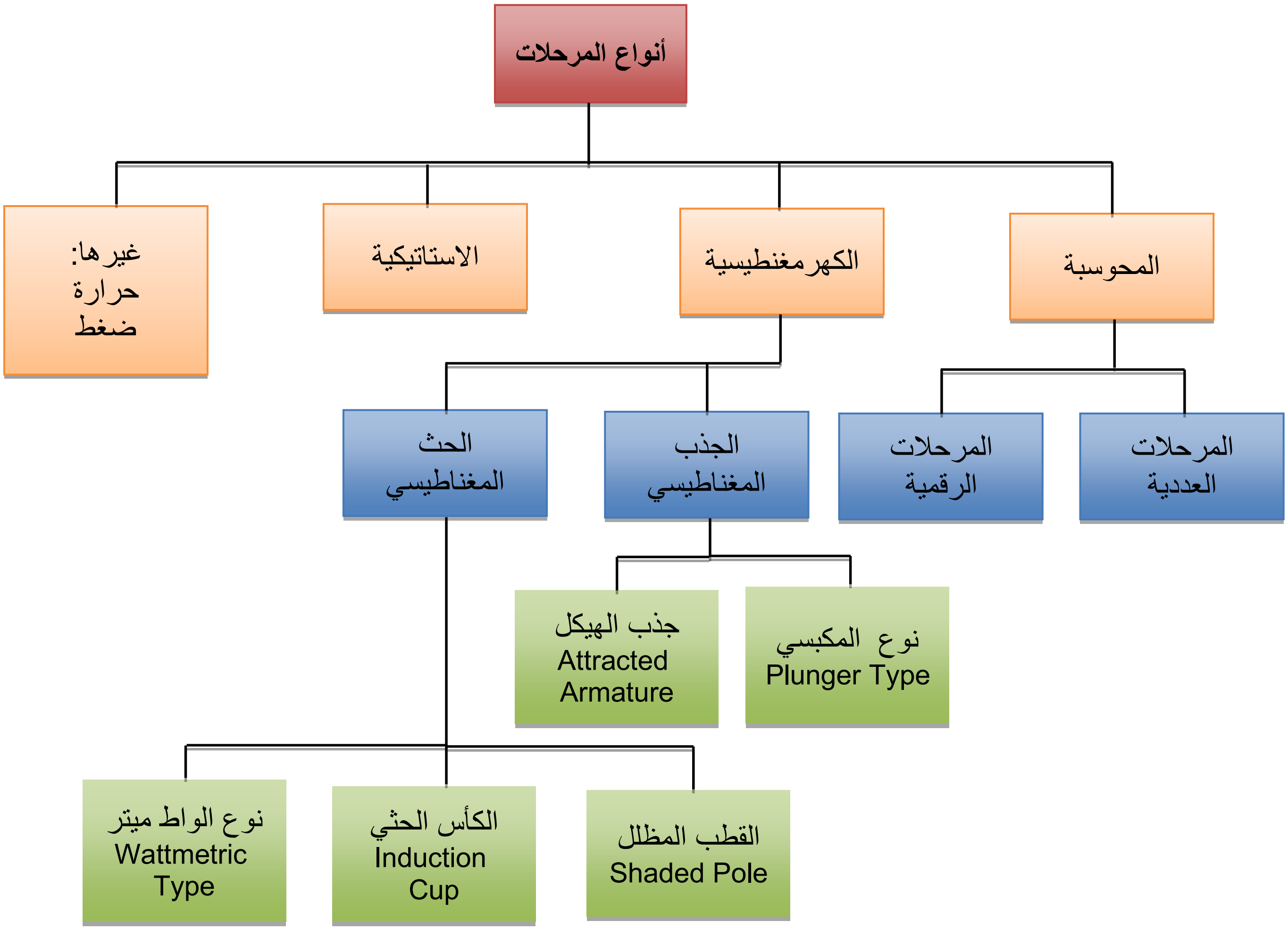
9-7-1 المرحلات الكهرومغناطيسية Electromagnetic relays

بدأت الأبحاث الخاصة بالمرحلات الكهرومغناطيسية في اواخر القرن التاسع عشر واستكملت تقنياتها في الثلاثينيات من القرن الماضي. إلا انها لازالت تستخدم إلى وقتنا الحاضر. هذه المرحلات تعد أولى الأنواع التي استخدمت بصورة واسعة في حماية انظمة القدرة بصورة عامة وخطوط النقل بصورة خاصة ويرجع تاريخ استخدامها لأكثر من 100 سنة . ومبدأ اشتغال هذه الأنواع من المرحلات يستند على انتاج قوة ميكانيكية تعمل على غلق ملامسات المرحل Contacts بواسطة محفز. والمحفز الذي ينتج القوة الميكانيكية قد يكون تيار يمر في ملف ملفوف حول قلب حديد لينتج مغناطيس كهربائي ولهذا تسمى هذه المرحلات بالكهرومغناطيسية.

من محاسن هذه المرحلات انها توفر عزل تام وبسيط ورخيص بين الكميات الداخلة والكميات الخارجة I/O وتكون بالأنواع الرئيسية التالية :

- مرحلات الجذب المغناطيسي Magnetic attraction type

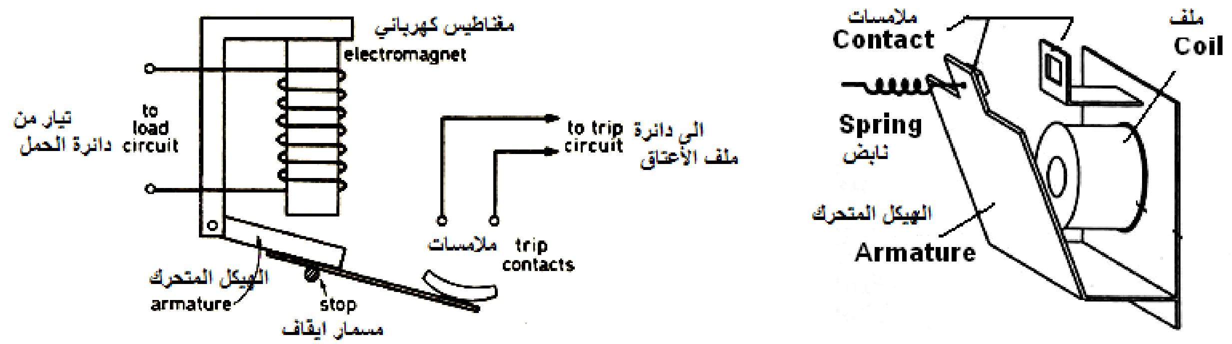
هذا النوع من المرحلات يمكن أن تشتغل بتيار مستمر DC أو تيار متناوب AC وتعمل بمبدأ تحريك قطعة معدنية تنجذب بواسطة مجال مغناطيسي يتم توليده بملف وتكون على نوعين :



الشكل 9-9 مخطط مرحلات حماية أنظمة القدرة وخطوط النقل.

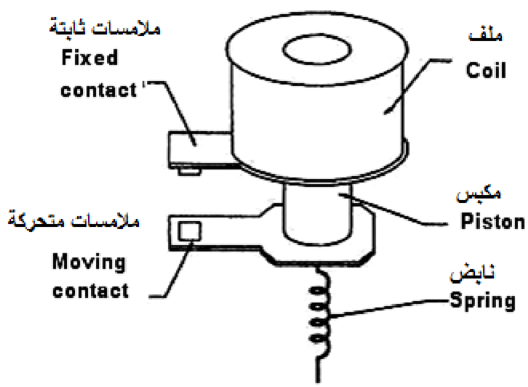
- الذراع المنجذب أو الصفيحة المنجذبة Attracted armature ، أنظر الشكل 9-10 . يتألف هذا المرحل من ذراع حديد أو صفيحة يتحركان حول مفصل ينجذبان بواسطة ملف مغناطيس كهربائي. حيث ينجذب الذراع للمغناطيس الكهربائي عندما تصل قيمة التيار في الملف لقيمة معينة معرفة مسبقاً I_o .

هذه القيمة تسمى بالتيار التشغيلي للمرحل Operating current . وينتج المغناطيس الكهربائي قوة ميكانيكية تجذب الذراع المتحرك ليغلق الملامسات ليتم تشغيل ملف الإعتاق لقاطع الدائرة حيث يحمل الذراع الملامسات المتحركة التي تغلق أو تفتح حسب تصميم المرحل.



الشكل 9-10 المرحل نوع الذراع المنجذب أو الصفيحة المنجذبة.

- النوع المكبسي Plunger type : أما النوع الثاني وهو النوع المكبسي المبين بالشكل9-11 الذي يحتوي على مكبس معدني ينجذب داخل ملف بفعل المجال المغناطيس ليغلق الملامسات التي تكون مثبتة على المكبس نفسه .



الشكل 9-11 مرحل النوع المكبسي .

ان القوة الميكانيكية المتولدة من مرحلات الجذب المغناطيسي يمكن اثبات انها تساوي $K_1I^2 - K_2$ حيث K_1 هو ثابت يعتمد على عدد لفات الملف ومساحة المقطع العرضي والمعاوقة المغناطيسية وطول الفجوة الهوائية للدائرة المغناطيسية للمرحل . أما K_2 فهو القوة المعيقة التي يبديها النابض ضد قوة التشغيل للمرحل. ويمكن إثبات المعادلة أعلاه من المبادئ الأساسية للدوائر المغناطيسية وكالآتي:

بصورة عامة نعرف ان القوة الميكانيكية F المتولدة من ملف تتناسب تناسبا طرديا مع مربع الفيض المغناطيسى φ ، أي أن :

$$F(t) \propto \varphi^2 \tag{9.1}$$

وبما أن الفيض هو حاصل قسمة القوة الدافعة المغناطيسية mmf على المعاوقة المغناطيسة $\mathscr{R}$

$$\therefore \quad \varphi = \frac{mmf}{\mathscr{R}} = \frac{N\,i}{\mathscr{R}} \tag{9.2}$$

حيث أن المعاوقة المغناطيسية بدلالة طول الفجوة l_g ومساحة المقطع العرضي للدائرة المغناطيسية A والإنفاذية المغناطيسية للهواء μ_0 تعطى كالآتي:

$$\mathscr{R} = \frac{l_g}{\mu_0\,A} \propto l_g \tag{9.3}$$

لذا فان

$$\varphi^2 \propto \frac{N^2 i^2}{l_g^2} \qquad \rightarrow \qquad \varphi = \frac{Ni}{l_g} \tag{9.4}$$

$$F(t) = k_\varphi\ \varphi^2 \tag{9.5}$$

$$F(t) = k_\varphi\ \frac{N^2 i^2}{l_g^2} = k_1 i^2 \tag{9.6}$$

ويمكن كتابة صافي القوة F_n كونها الفرق بين القوة المغناطيسية العاملة F وقوة الإرجاع للنابض المضادة k_2، لذا فان

$$F_n(t) = F(t) - k_2 \tag{9.7}$$

وإذا كان المرحل في حالة توازن فان محصلة القوى عليه تكون صفرا لينتج

$$F_n(t) = 0 \ \rightarrow \quad k_1 i^2 - k_2 = 0 \tag{9.8}$$

$$k_1 i^2 = k_2$$

ويكون التيار اللازم لجعل المرحل في حالة الاتزان

$$I = \sqrt{\frac{k_2}{k_1}} \qquad (9.9)$$

حيث I هي قيمة ج م ت للتيار (RMS value of i)

- مرحلات الحث المغناطيسي Magnetic Induction type

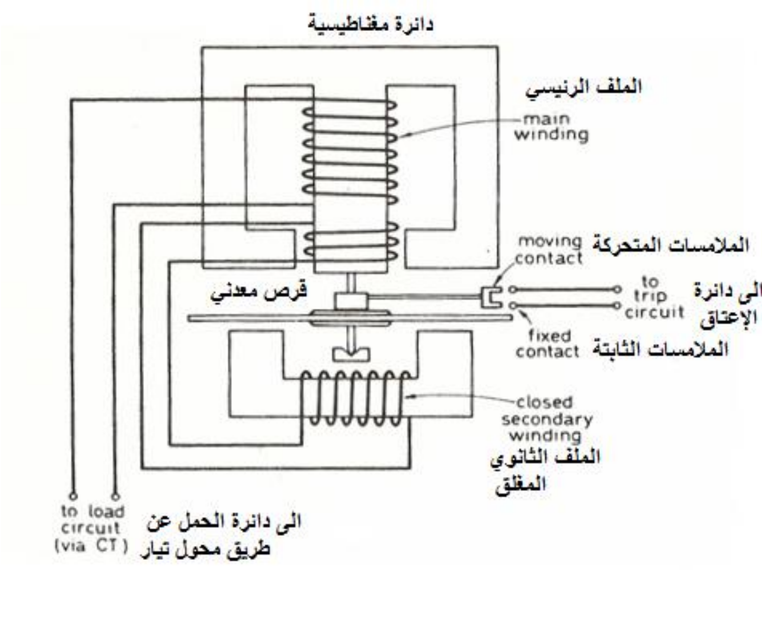
تعتمد مرحلات الحث المغناطيسي أو المرحلات الحثية في عملها على التفاعل المتبادل بين فيضين مغناطيسيين $\emptyset_1$ و $\emptyset_2$ اللذان ينتجهما تياري ملفان مختلفان i_1 و i_2 وبين التيارات الدوامية المحتثة في الجزء المعدني المتحرك من المرحل . في العموم يمكن اثبات ان عزم التدوير الكهرومغناطيسي المنتج T يتناسب طرديا مع كل من $\emptyset_1$ و $\emptyset_2$ وجيب الزاوية المحصورة بينهما θ أي أن :

$$T \propto \emptyset_1 \, \emptyset_2 \, \sin\theta$$

وللحصول على فيضين مغناطيسين بينهما زاوية تستخدم إحدى أنواع المرحلات الحثية التالية:

(1) المرحل الواطمتري Wattmetric-type relay

يشبه تركيب هذا المرحل تركيب مقياس الطاقة الكهربائية (kWh) الكيلواط - ساعة ، المبين في الشكل 9-12 حيث يحتوي على مغناطيسين كهربائيين متمثلان بالملف الرئيسي والملف الثانوي المغلق . إلا



الشكل 9-12 المرحل الواطمتري الحثي.

أن المغناطيس السفلي يمد بالطاقة بوساطة التقارن المتبادل من المغناطيس العلوي. المبدأ الأساسي لعمل هذا المرحل الحثي هو أن هذين الملفين يعملان على قرص معدني (سواء كان من نحاس أو المنيوم) مثبت على منظومة ميكانيكية بحيث تجعل القرص يدور بحرية تامة ويقطعه فيضان متناوبان لهما زاوية طور مختلفان.

هذان الفيضان يحثان تيارات دوامة في القرص. وكل فيض منهما يتفاعل مع التيارات الدوامة للفيض الآخر لتوليد عزوم تعمل بدورها على تدوير القرص وتتصل به آليا الملامسات المتحركة لكي تتحرك بتحرك القرص أي توضع ملامسات التوصيل المتحركة على عمود دوران المرحل نفسه. وتغلق الملامسات الثابتة لغرض تشغيل دائرة ملف الإعتاق لقاطع الدائرة. وتصمم غالبية مرحلات التيار الزائد من النوع الواطمتري المذكور كما يمكن الحصول على تأخير زمني بواسطة هذا النوع من المرحلات وذلك بضبط المسافة بين الملامسات المتحركة والملامسات الثابتة للحصول على زوايا مختلفة.

نظرية اشتغال المرحل الحثي

ينتج كل ملف من الملفين في المرحل الحثي فيضا مغناطيسيا متناوبا هما φ_1 و φ_2 وكالاتي :

$$\phi_1 = \phi_{1m} \sin \omega t$$

$$\phi_2 = \phi_{2m} \sin(\omega t + \theta)$$

حيث يتقدم ϕ_2 على ϕ_1 طوريا بزاوية مقدارها θ.

هذان الفيضان المغناطيسيان سوف ينتجان تيارين دوارين Eddy currents في القرص المعدني هما $i_{\phi1}$ و $i_{\phi2}$ ، حيث يتناسب التيار الأول مع تغير الفيض الأول مع الزمن ($i_{\phi1} \propto \frac{d\phi1}{dt}$) ويتناسب التيار الثاني مع تغير الفيض الثاني مع الزمن ($i_{\phi2} \propto \frac{d\phi2}{dt}$) .

أو بتعبير آخر :

$$i_{\phi1} \propto \phi_{1m} \cos \omega t$$

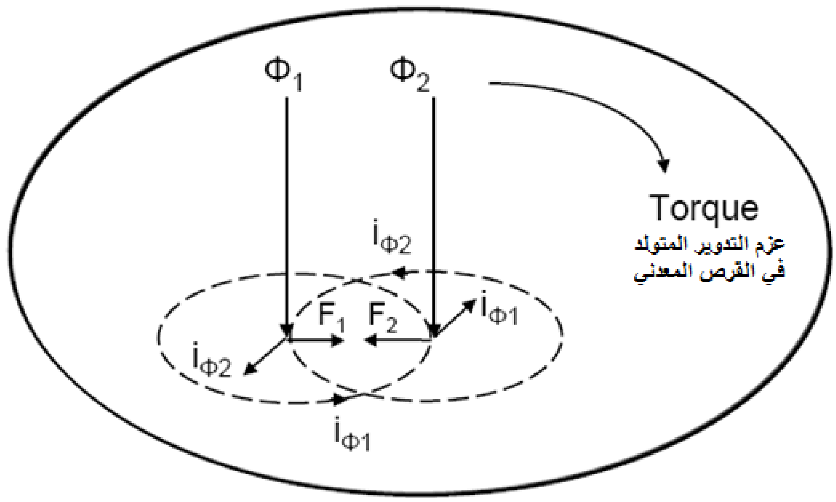
$$i_{\phi2} \propto \phi_{2m} \cos(\omega t + \theta)$$

هذان التياران المحتثان سوف يتقاطعان مع الفيضين ليولدان قوتين متعاكستين تعملان على تدوير القرص المعدني وكالآتي ، انظر الشكل 9-13 الذي من خلاله نستنتج :

- يتقاطع الفيض ϕ_1 مع التيار $i_{\phi2}$ ليولد القوة F_1
- يتقاطع الفيض ϕ_2 مع التيار $i_{\phi1}$ ليولد القوة F_2

وتكون محصلة القوى المتولدة F هي

$$F = F_2 - F_1 \propto [\phi_2 i_{\phi 1} - \phi_1 i_{\phi 2}]$$



الشكل 9-13 التيارات المحتثة في القرص المعدني وتوليد عزم التدوير.

وبتعويض قيم التيارات اللحظية والفيوض وتبسيط المعادلة اعلاه نحصل على:

$$F \propto \phi_{1m}\phi_{2m} \sin\theta$$

فاذا كان نصف قطر القرص المعدني هو r فان هذه القوة سوف تنتج عزم حول محور القرص مقداره Fr.

أي ان العزم المتولد سيكون $T = Fr \propto F$ ، أو

$$T = K_1\phi_{1m}\phi_{2m} \sin\theta$$

فاذا كان Φ_1 و Φ_2 هما قيم جذر مربع التربيع لكل من ϕ_1 و ϕ_2 على التوالي فان

$$F \propto \Phi_1\Phi_2 \sin\theta$$

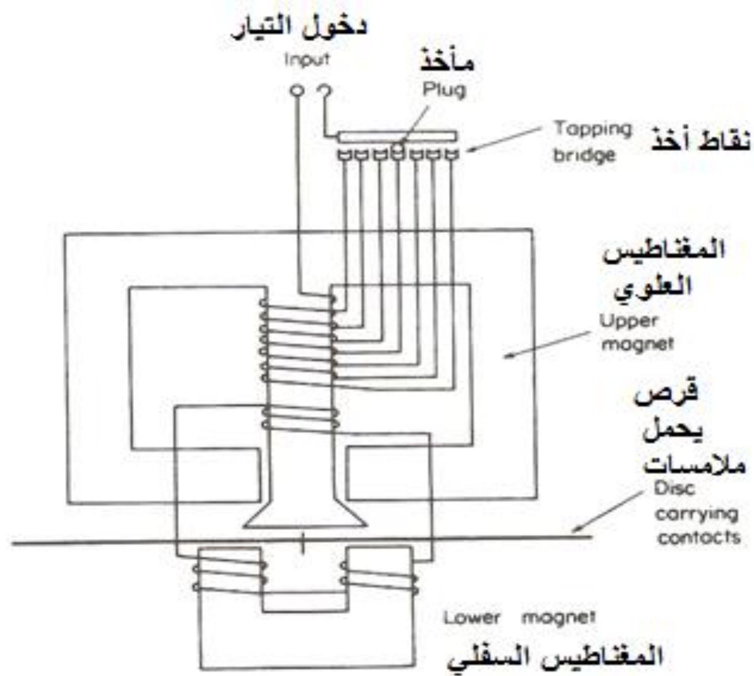
عليه فان $T \propto \Phi_1\Phi_2 \sin\theta$ وبدلالة التيار يكون العزم النهائي المتولد الذي يعمل على تدوير القرص كالآتي:

$$T \propto I_1 I_2 \sin\theta$$

$$T = K_t I_1 I_2 \sin\theta$$

(2) المرحل الحثي ذو مأخذ تنظيم (ضبط) Induction relay with plug setting :

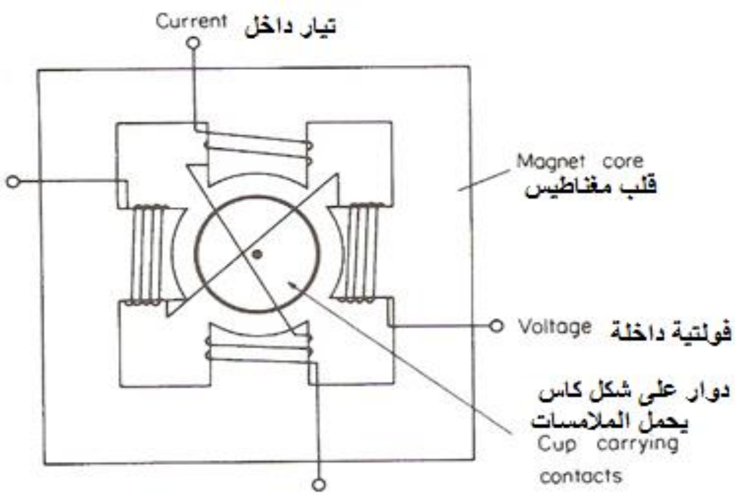
تصمم المرحلات الحثية عادة للاشتغال بتيار 5 أمبير، ولأجل ان تشتغل بتيارات أخرى بدلا من تغيير الملف الخاص بها تزود بملف متعدد اللفات يخرج منه مآخذ متعددة تسمى مآخذ التنظيم Plug settings وكما موضح في الشكل 9-14. ويتم تدريج نقاط الأخذ في الملف كل 25% ولغاية 200%. فمثلا إذا وضعنا المأخذ على 100% فسوف يشتغل المرحل بتيار 5 أمبير واذا وضعنا المأخذ على 125 % فسوف يعمل المرحل بتيار 6.25 امبير وهكذا.



الشكل9-14 مآخذ التيار في المرحلات الواطمترية .

(3) المرحل الحثي ذو الكأس المعدني Induction-Cup relay :

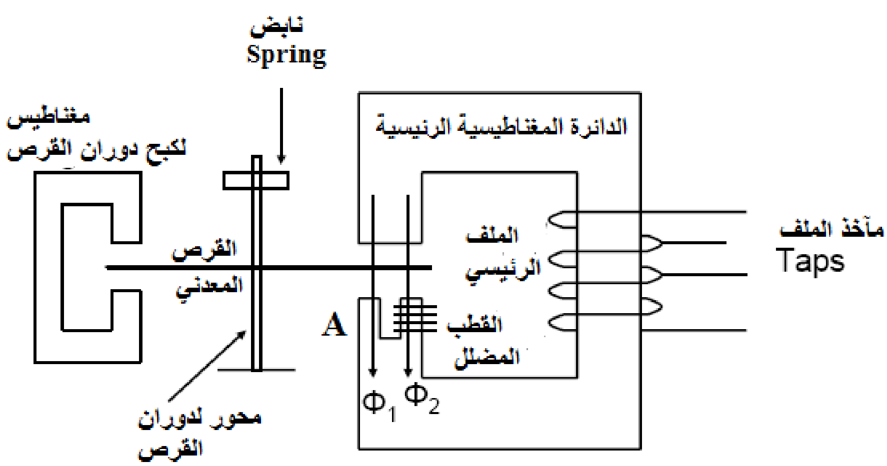
عمل هذا المرحل مشابه تماماً لعمل المرحل الواطمتري ذي القرص المعدني، هنا يتم توليد مجالين مغناطيسيين بينهما زاوية 90 درجة وهذان المجالان يحثان تيارات دوامة في دوار معدني على شكل اسطوانة مجوفة مغلقة من جانب واحد أو كأس يحمل ملامسات متحركة. ويبين الشكل 9-15 مرحل ذي أربعة أقطاب.



الشكل 9-15 مرحل حثي كأسي ذي أربعة أقطاب.

(4) المرحل الحثي ذو القطب المضلل Shaded-pole relay

في هذا المرحل يتم قص وحفر الدائرة المغناطسية الرئيسية في المنطقة A الموضحة بالشكل 9-16 ومن ثم يتم تلبيس ملف أو حلقة معدنية في أحد نتوءات الجزء المقصوص لكي نحصل على مجالين مغناطسيين ϕ_1 و ϕ_1 بينهما زاوية يعملان على توليد عزم في القرص المعدني الذي يحمل الملامسات المتحركة.



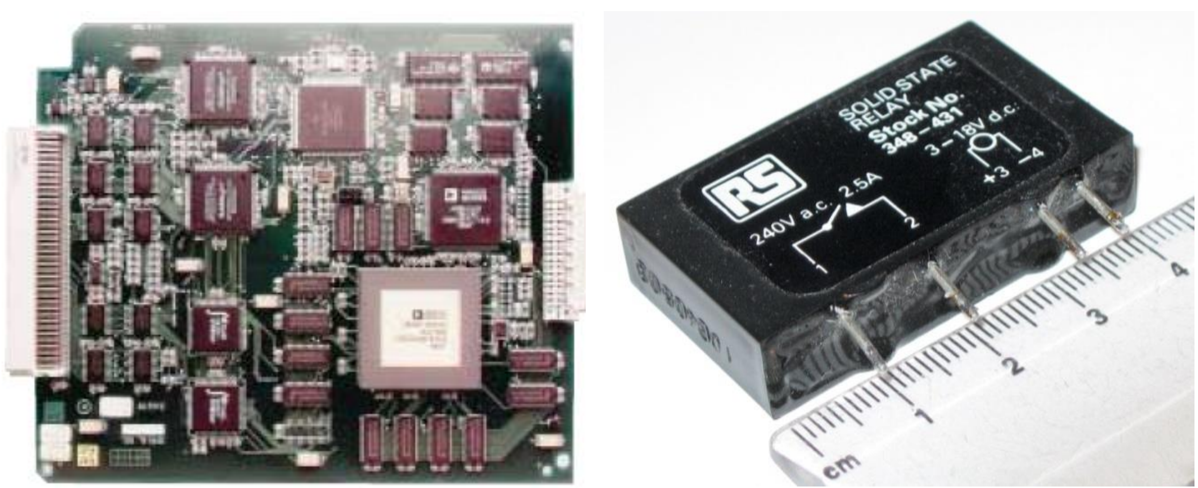
الشكل 9-16 المرحل الحثي ذو القطب المضلل.

أما خصائص المرحلات الحثية فتتلخص بصورة عامة بما يأتي:

- ملائمة لمنظومات التيار المتناوب
- عزم التدوير المتولد فيها ثابت ولا يتغير مع الزمن أي انها خالية من الاهتزازات الميكانيكية
- ترفض الاشتغال على جميع مركبات التيار المستمر ولهذا يعتبر وصولها الحمائي منخفض

9-7-2 المرحلات الألكترونية (الستاتيكية) Solid State Relays

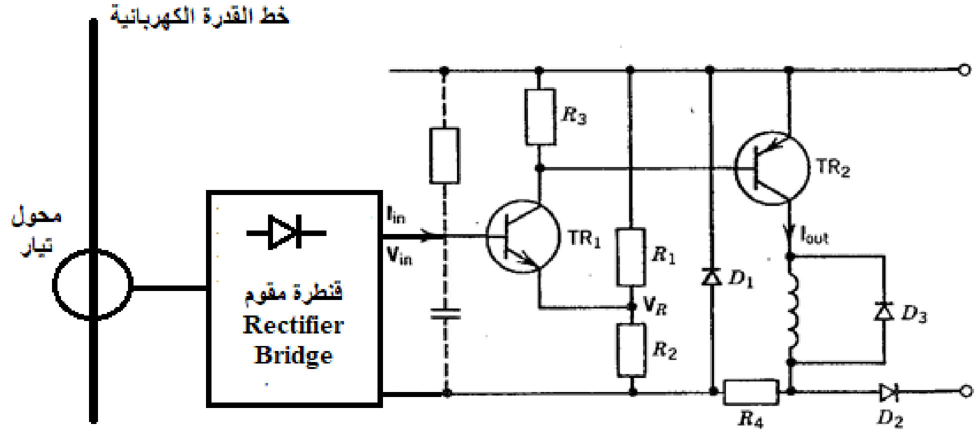
بدأت الأبحاث حول المرحلات الألكترونية في فترة الأربعينيات من القرن الماضي وكان أول انتاج لها على النطاق التجاري في نهاية الخمسينيات. أما تطورها التام فكان في الستينيات حيث كان لظهورها صداً واسعا لما امتازت به من محاسن مقارنة بالمرحلات الكهرومغناطيسية كونها أصغر حجماً وأرخص ثمناً. واستخدمت النبائط الإلكترونية البسيطة في تصاميمها لأجيالها الأولية مثل الترانزستورات والمقومات السليكونية (الدايودات) والمقاومات والمتسعات وغيرها بدلاً من الملفات والدوائر المغناطسية ذات القلوب الحديدية كبيرة الحجم وثقيلة الوزن . لكن التطور المتسارع في صناعة الدوائر المتكاملة آنذاك ساهم في انتاج مرحلات ستاتيكية صغيرة الحجم كما موضحة في الشكل 9-17.



الشكل 9-17 مرحلات الكترونية (ستاتيكية) للحماية ضد التيار الزائد.

مبدأ اشتغال المرحلات الإلكترونية:

تمتاز المرحلات الإلكترونية بانها سريعة جدا في عملها كونها لا تحتوي على أجزاء ميكانيكية متحركة، لذا فهي سريعة الاستجابة وذات وثوقية عالية لكونها لا تعطل بسهولة. يبين الشكل 9-18 العناصر



الشكل 9-18 دائرة مرحل الكتروني (ستاتيكي) للحماية ضد التيار الزائد Overcurrent.

الأساسية لمرحل الكتروني ذو طور واحد للحماية ضد التيار الزائد مع دائرة تأخير زمني حيث يمكن تلخيص عمل هذا المرحل كما يأتي:

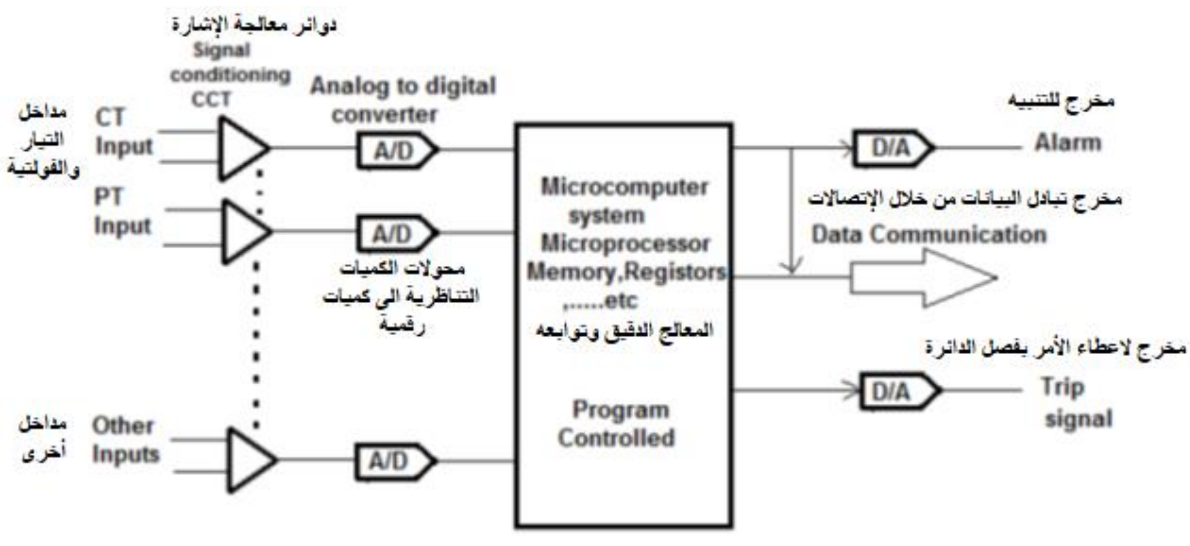
- التيار المتناوب الخارج من ثانوي محول التيار CT يتم تحويله إلى تيار مستمر بواسطة قنطرة مقوم ثم يحول إلى فولتية V_{in} بواسطة مقاومة توازي.
- تستخدم دائرة RC لغرض الحصول على التأخير الزمني المطلوب لاشتغال المرحل.
- إذا كان مقدار الفولتية $V_i < V_R$ فان دائرة الباعث – القاعدة للترانزستور TR_1 سوف تكون منحازة عكسيا وهذا يعني أن الترانزستور سوف يبقى في حالة عدم توصيل Off .
- إذا كان مقدار الفولتية $V_i > V_R$ فان دائرة الباعث – القاعدة للترانزستور TR_1 سوف تكون منحازة أمامياً وهذا يعني أن الترانزستور سوف يتحول إلى حالة التوصيل التام On وبدوره سوف يقوم بتشغيل الترانزستور الثاني TR_2 الذي يمرر تيار في المرحل الميكانيكي الصغير في دائرة الخرج أو يقوم بتشغيل ثايرستور خارجي لقطع دائرة رئيسية.
- يتم ضبط قيمة V_R من خلال اختيار قيم ملائمة لكل من المقاومتين R_1 و R_2 .

3-7-9 المرحلات المحوسبة Computerized relays:

بعد التطور الذي حصل في علم الإلكترونيات في مرحلة الستينيات من القرن الماضي وذلك بتطوير صناعات الدوائر المتكاملة وظهور أول معالج دقيق Microprocessor تم تصنيعه من قبل شركة موتوريلا

بدء التوجه لتطوير المرحلات الإلكترونية وكان الحل الفني والاقتصادي الأمثل هو استخدام تقنية المعالج الدقيق وكان ذلك في مرحلة نهاية السبعينات وبداية الثمانينيات التي شهدت ظهور أول انواع المرحلات المحوسبة على النطاق التجاري وهو المرحل الرقمي.

(1) المرحل الرقمي: يعرف المرحل الحمائي المحوسب الرقمي بوصفه مرحل يستخدم المعالج الدقيق الذي يقوم بجمع البيانات من خلال محولات طاقة Transducers مثل محولات التيار ومحولات الفولتية ومتحسسات الحرارة والضغط وغيرها ثم يتم تحويلها إلى صيغة يمكن للمعالج الدقيق أن يتعامل معها. المعلومات الواردة من جميع محولات الطاقة يتم تكبيرها بواسطة مضخمات Amplifiers ثم نمذجتها Sampled بترددات عالية بعدة آلاف من الهرتز. هذه البيانات المنمذجة Sampled Data يتم تحويلها من الصيغة التناظرية إلى الصيغة الرقمية بواسطة محولات A/D ثم تغذيتها إلى منظومة المسجلات في المعالج الدقيق وهذا بدوره قد يستخدم اسلوب حسابي Counting technique معين أو يستخدم طريقة تحويل فورير المتقطع Discrete FT لغرض مقارنة نتائج القيم المحسوبة مع قيم مرجعية مخزونة للقرار فيما اذا كانت القيم الداخلة طبيعية ام غير طبيعية لاتخاذ القرار بتشغيل قاطع الدائرة من عدمه واعطاء الإشارة والتنبيه بوجود عطل. ويبين الشكل 9-19 مخطط لمرحل محوسب بسيط. كذلك يبين الشكل 9-20 نماذجاً عملية من المرحلات الرقمية المستخدمة في القواطع.



الشكل 9-19 المرحل الرقمي المحوسب.



الشكل 9-20 المرحلات الرقمية للقواطع - نماذج صناعية من المرحلات الرقمية.

بنية المرحل الرقمي Digital Relay Construction

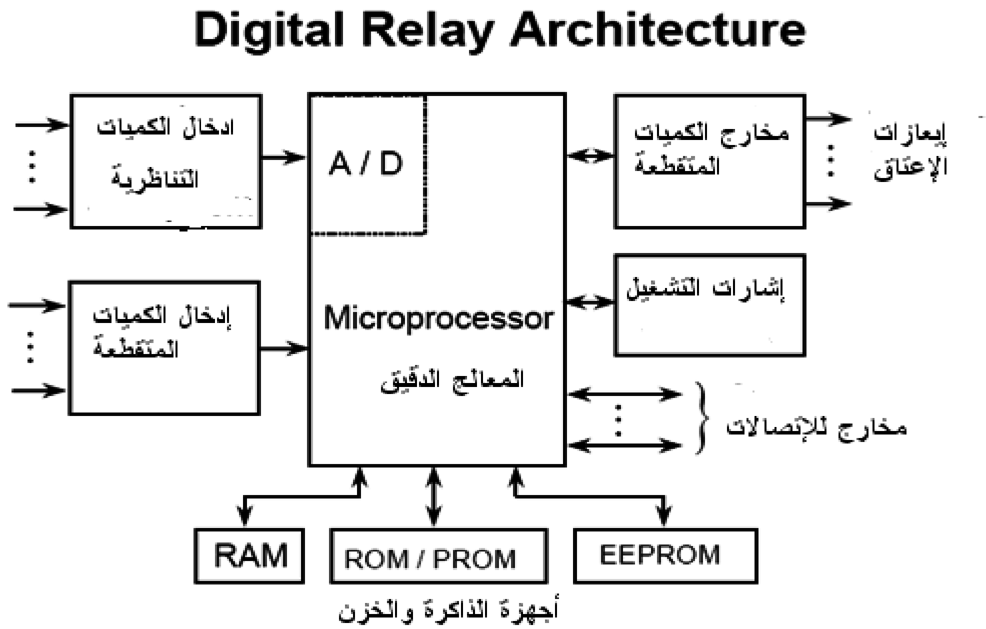
العناصر الأساسية التي تشمل بناء أو تركيب المرحل الرقمي هي:

- منظومة ثانوية لإدخال الكميات التناظرية Analog Input Subsystem
- منظومة ثانوية لإدخال الكميات المتقطعة Input Subsystem Discrete
- محول كميات تناظرية الى كميات رقمية A/D Converter
- معالج دقيق Microprocessor
- منظومة ثانوية لإخراج الكميات المتقطعة Subsystem Output Discrete
- منظومة ثانوية لإشارات التشغيل Operating signaling subsystem
- منظومة ثانوية للاتصالات Communication subsystem

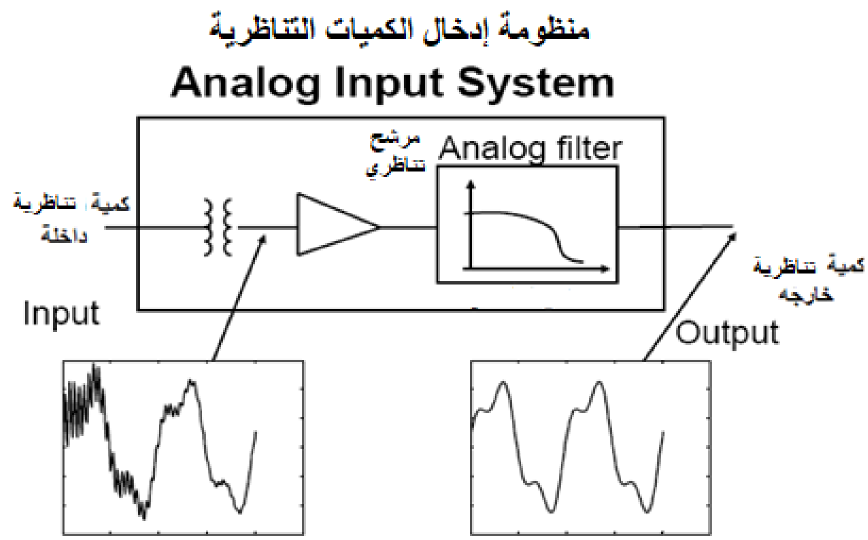
ويوضح الشكل 9-21 بنية المرحل الرقمي.

ولغرض فهم عمل المرحل الرقمي بالرسوم دعنا نتابع مراحل العمليات خلالها وكما يأتي:

- العملية الأولى: تدخل اشارات الكميات التناظرية كالتيارات أو الفولتيات مثلا عن طريق محول تيار أو محول فولتية حيث يتم تكبيرها وترشيحها بواسطة مرشح تناظري كما موضح في الشكل 9-22.

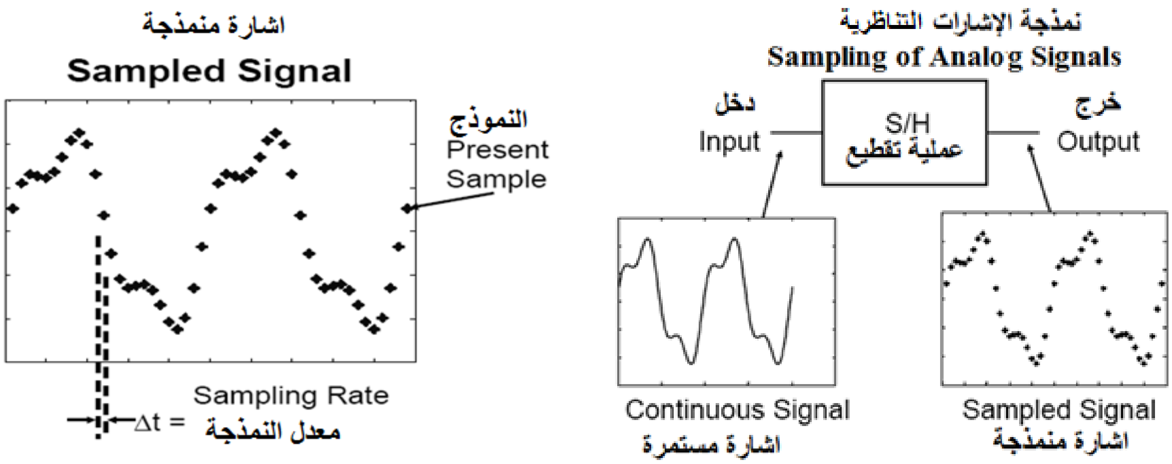


الشكل 9-21 بنية (تركيب) المرحل الرقمي.



الشكل 9-22 العملية الأولى في المرحل الرقمي.

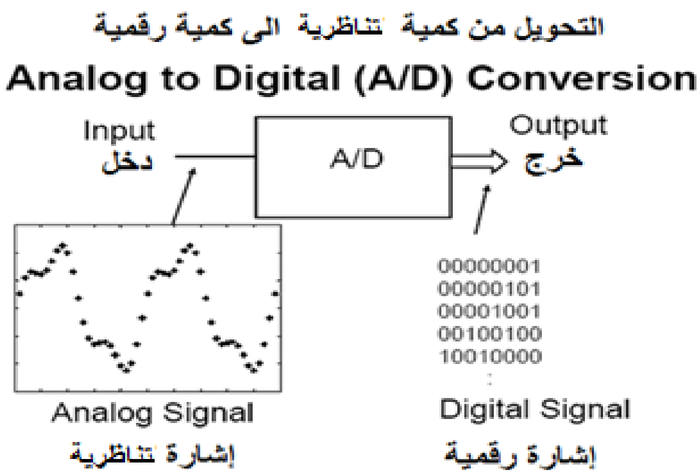
- العملية الثانية: نمذجة الإشارات التناظرية أي تحويلها من كميات مستمرة إلى كميات متقطعة بواسطة المنمذج S/H (Sample and Hold) الذي يقوم بقطع ووصل الإشارة بمعدل زمني Δt يدعى بمعدل النمذجة وبذلك تتحول الإشارة المستمرة إلى إشارة منمذجه (متقطعة) وكما موضحة في الشكل 9-23 .



(ب) (أ)

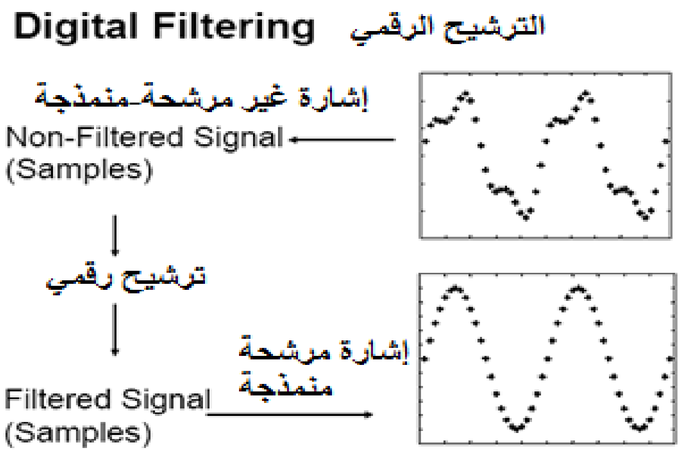
الشكل 9-23: (أ) عملية النمذجة ، (ب) الإشارة المنمذجة .

- العملية الثالثة: تحويل الكميات التناظرية إلى كميات رقمية بواسطة محول تناظري/ رقمي A/D Converter وكما موضح في الشكل 9-24 .



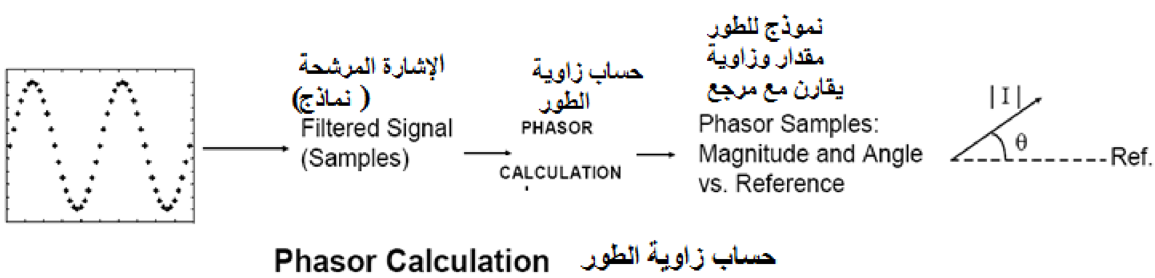
الشكل 9-24 محول الكميات التناظرية الى رقمية A/D Conversion .

- العملية الرابعة: ترشيح الإشارة الرقمية بواسطة مرشح رقمي كما موضح في الشكل 9-25.



الشكل 9-25 مرحلة الترشيح الإشارة بواسطة مشح رقمي.

- العملية الخامسة: حساب مقدار وزاوية الطور لإشارة التيار مثلاً، حيث تتم مقارنتهما بمقدار وزاوية طور مرجعيان مخزونين في ذاكرة المرحل ، فإذا كان المرحل يعمل بمقارنة زاوية الطور مع القيمة المرجع فسوف يقرر المرحل فيما إذا كان هناك ظرف غير اعتيادي من عدمه. أنظر الشكل 9-26.

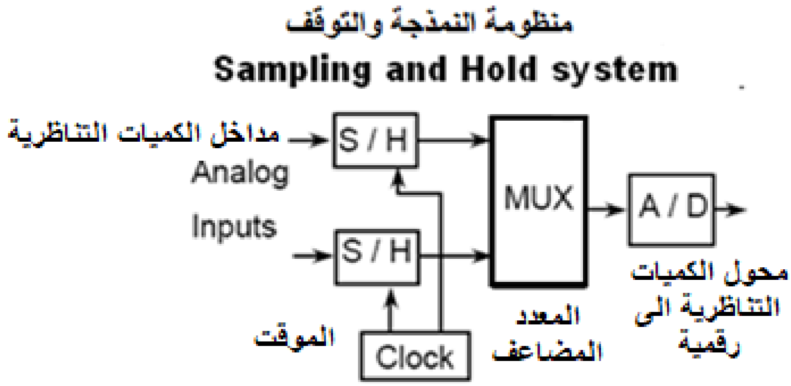


الشكل9-26 مرحلة حساب الطورللإشارة المرشحة.

وتجدر الإشارة إلى أن عملية تنظيم إدخال الإشارات المختلفة (تيار، فولتية، حرارة، ضغط ....الخ) إلى المرحل الرقمي يتم بواسطة استخدام الخلاط المتعدد المدخلات Multiplexer المبين في الشكل 9-27.

خوارزمية المرحل الرقمي

يقصد بخوارزمية المرحل هي مجموعة من العمليات الرياضية معدة بصيغة برنامج حاسوبي Program ، حيث تنفذ هذه العمليات على آخر النماذج من الاشارة الداخلة المنمذجة وليكن تسلسلها N مثلاً



الشكل 9-27 منظومة الإدخال المتعدد الإشارة.

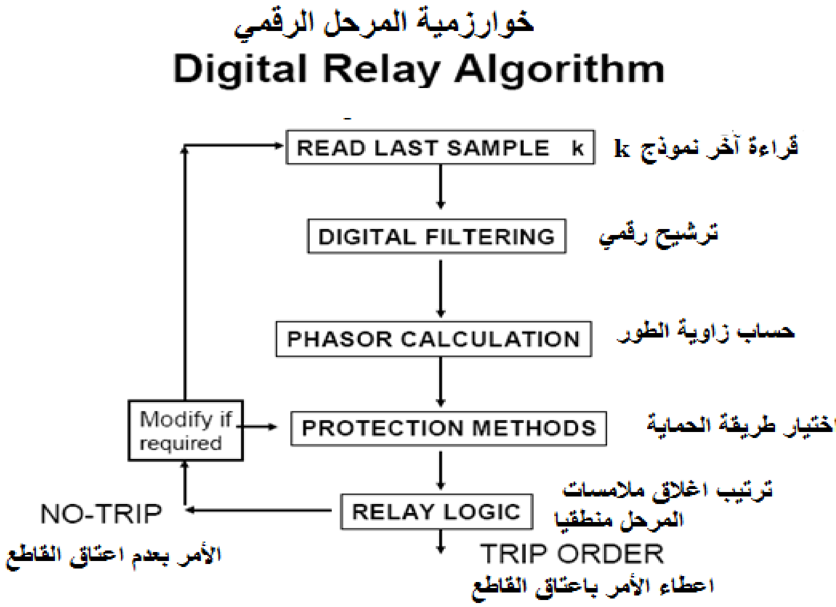
ويقوم المرحل باتخاذ القرار بإعتاق قاطع الدائرة من عدمه بناء على النتائج المستخلصة من خوارزمية المرحل. وتشمل العمليات الرتيبة للخوارزمية ما يلي:

- الخطوة الأولى في البرنامج هو برنامج ثانوي لقراءة آخر نموذج من الإشارة الداخلة.
- برنامج ثانوي لتصفية وترشيح الإشارة بواسطة مرشح رقمي لتخليصها من وجود التوافقيات الضارة ومركبات التيار المستمر DC للحصول على المركبة الأساسية للإشارة فقط.
- برنامج ثانوي لحساب زاوية الطور بين الفولتية V والتيار I من نماذج الإشارة المنمذجة الداخلة.
- برنامج ثانوي لإختيار نوع وطريقة الوقاية حسب قرار المرحل (حماية ضد التيار الزائد أو ارتفاع الفولتية أو انخفاض التردد ...الخ)
- برنامج ثانوي لترتيب اغلاق ملامسات المرحل منطقيا بعد اتخاذ القرار بإعتاق جهاز الحماية من عدمه وإعادة قراءة النموذج الأخير للإشارة في حالة عدم وجود عطل أو ظرف غير طبيعي. ويبين الشكل 9-28 المخطط الانسيابي لخوارزمية المرحل الرقمي.

مزايا ومحاسن المرحل الرقمي

يمتاز المرحل الرقمي عن بقية المرحات بمزايا ومحاسن كثيرة منها:

- قليلة الكلفة
- متعددة الوظائف
- حماية وتحكم
- قياسات كهربائية
- تسجيل الأعطال



الشكل 9-28 خوارزمية المرحل الرقمي.

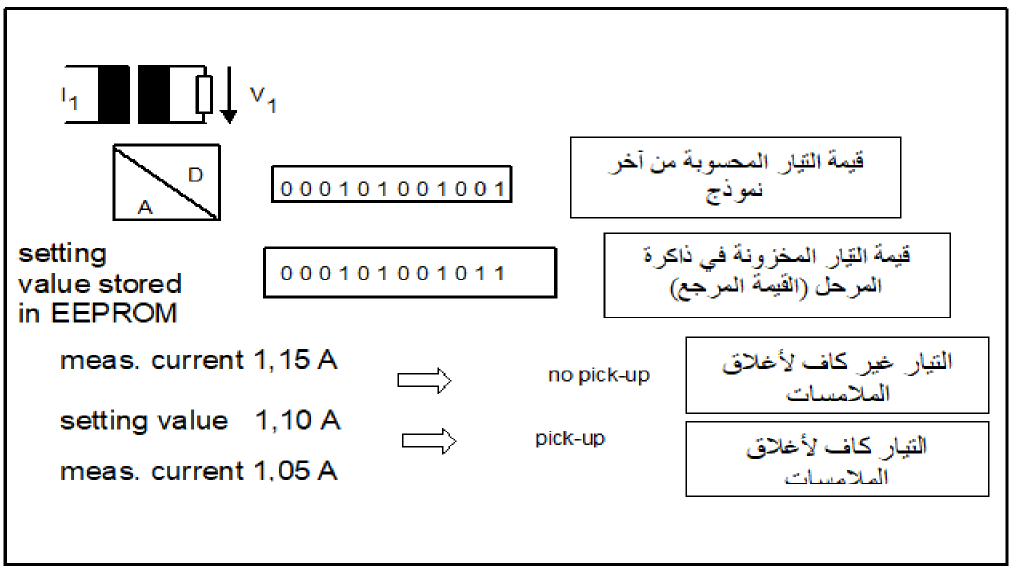
- القابلية على الاتصال والتواصل مع المعدات الرقمية الأخرى
- ذو وثوقية عالية
- الفحص الذاتي والقدرة على التكيف الذاتي
- لا تحتاج لصيانة دورية
- خصائص حمائية متعددة ومتنوعة وجديدة
- حساسية وانتقائية كافية
- العبء الذي تسلطه على محول التيار والفولتية قليل
- ذات حساسية أقل لدرجات الحرارة وتقادم الزمن
- سهولة التنظيم وادخال البيانات واستخراجها

وبالرغم من امتلاك المرحلات الرقمية هذه المزايا المتعددة التي تفوقت بها على جميع أنواع المرحلات الأخرى إلا أن تعقيد الأنظمة الرقمية تتطلب أشخاص مدربين تدريباً خاصاً للعملية. كذلك فان التقدم المطرد في الاختراعات الرقمية يسرع في عملية خروج الأنواع الحديثة من الخدمة بسرعة غير متوقعة وتصبح من الأجهزة التي عفا عليها الزمنّ.

(2) المرحلات العددية

المرحلات العددية هي نوع من انواع المرحلات المحوسبة. وقد كانت منذ فترة قصيرة تدرج ضمن المرحلات الرقمية إلا أنه تم اعطائها كيان مستقل في التصنيف الحديث للمرحلات.

يختلف المرحل العددي عن المرحل الرقمي بتقنية العد Counting technique حيث يستخدم المرحل العددي تقنية معالجة الإشارة الرقمية DSP بدلاً من تحويل فورير المتقطع DFT حيث يتم تحويل التيار المقاس I_1 الى فولتية V_1 تحول إلى أعداد رقمية تتم مقارنتها مع قيم مرجعية على شكل أعداد رقمية أيضاً مخزونة مسبقاً. فاذا كانت القيم المقاسة أقل من تلك المخزونة في الذاكرة لا يتم إصدار أمراً بالتشغيل وخلافه سوف يصدر المرحل أمره بتشغيل ملف الإعتاق للقاطع كما في المثال الموضح في الشكل 9-29، كذلك يوضح الشكل 9-30 خوارزمية المرحل الرقمي.

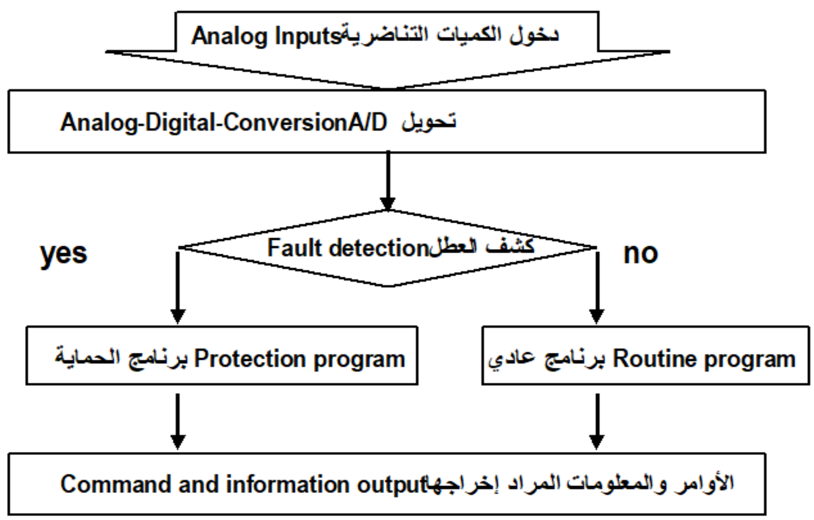


الشكل 9-29 المرحلات العددية : معاملة القياسات العددية في مرحل عددي.

أما مزايا المرحل العددي فتشمل:

- إعطاء معلومات شاملة وواسعة
- تسجيل واضح ودقيق لسلسة الأحداث في حالة حدوث عطل في النظام الكهربائي، وتشمل سلسلة الأحداث هذه ما يأتي:
  - ➢ ما الذي حدث فعليا ؟

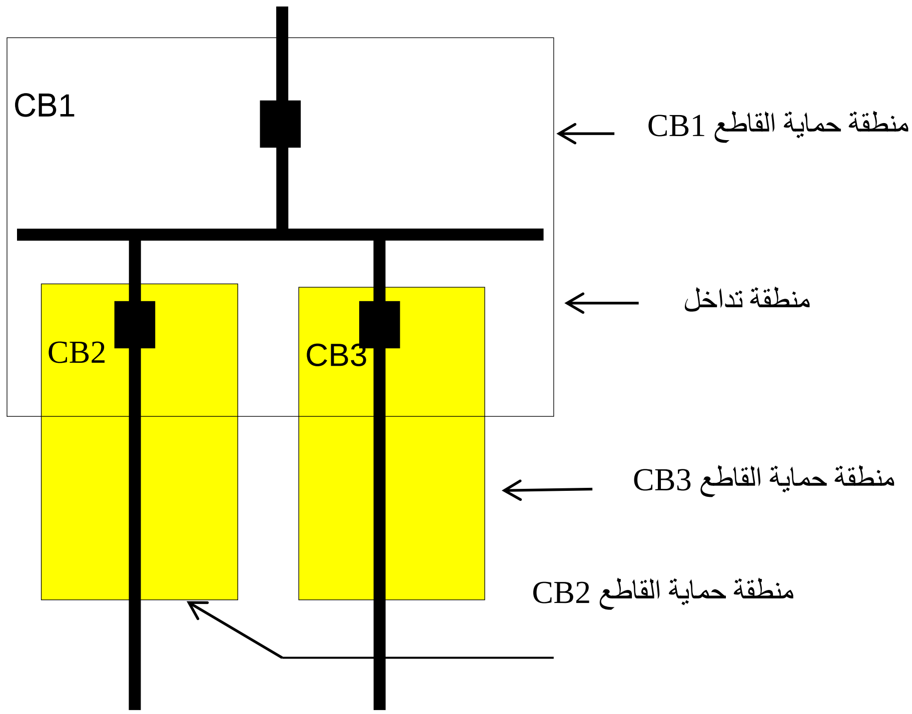
- كيف كان شكل موجة التيار والفولتية الخارجتان من محولي التيار والفولتية وهل حدث تشبع مغناطيسي في محول التيار؟
- متى تم إصدار أمر تشغيل الحماية بإعتاق قاطع الدائرة ؟
- كم من الوقت استغرق القاطع لتشغيل نفسه؟
- كم كان مقدار تيار العطل الذي تم قطعه؟
- كيف تصرف النظام الكهربائي بعد حدوث العطل؟



الشكل 9-30 المرحلات العددية: مخطط انسيابي بسيط لتنفيذ خوارزمية الحماية في المرحلات العددية، نمط التشغيل للمرحل العددي.

8-9 مناطق الحماية Protection Zones

تعرف منطقة الحماية بوصفها المكان أو النطاق أو المسافة التي يمكن أن يحميها المرحل بسهولة. ويوضح الشكل 9-31 مثال بسيط لمناطق حماية لثلاثة قواطع دائرة حيث يلاحظ وجوب تداخل مناطق الحماية مع بعضها البعض.



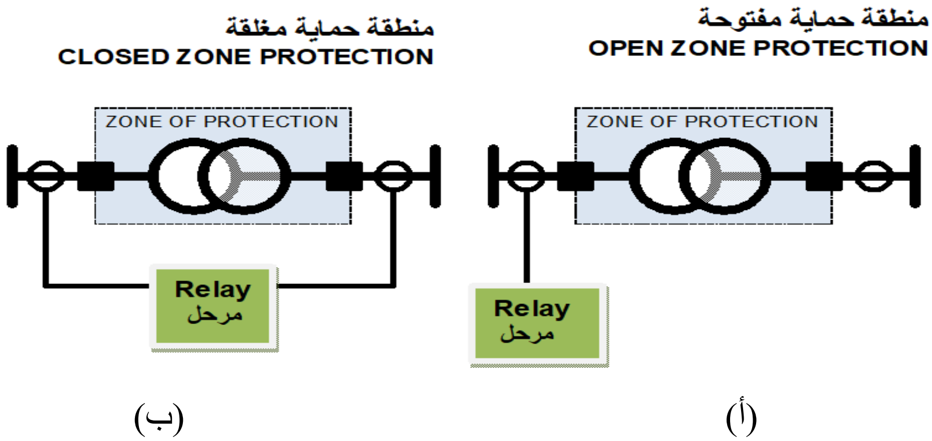
الشكل 9-31 مناطق حماية متداخلة .

في انظمة القدرة يجب تامين منطقة حماية واحدة في الأقل لكل عنصر من عناصر النظام. أما العناصر المهمة فيجب شمولها بمنطقتي حماية في الأقل، ويجب أن تتداخل مناطق الحماية لضمان عدم ترك أي عنصر بدون حماية. ويجب أن يكون التداخل محدد وصغير لتفادي قطع عناصر من النظام غير معرضة للعطل. ومنطقة الحماية تحدد عادة بواسطة محول تيار وقاطع دائرة حيث يقوم محول التيار بكشف العطل ويقوم قاطع الدائرة بإزالة ذلك العطل.

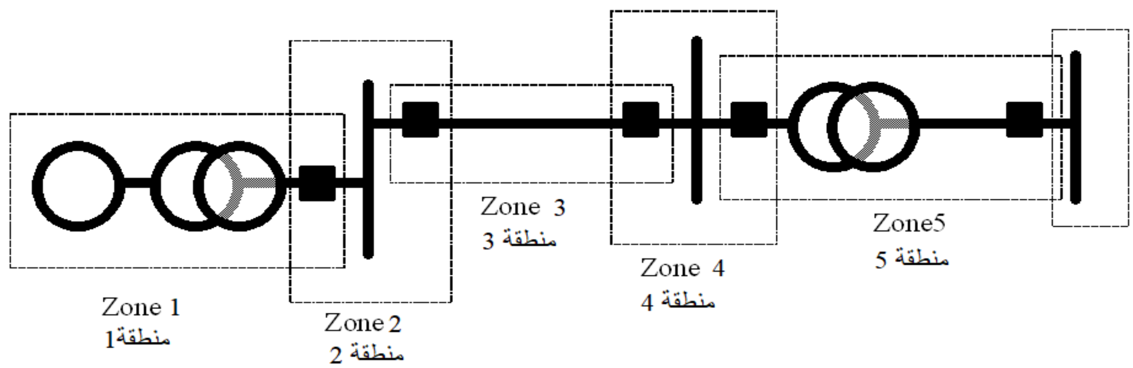
تكون مناطق الحماية على نوعين وكالآتي:

- منطقة حماية مفتوحة كما في الشكل 9-32 (أ)
- منطقة حماية مغلقة كما في الشكل 9-32 (ب)

بصورة عامة يتم تقسيم نظام القدرة إلى مناطق يتم حمايتها كالآتي: منطقة مولدات، منطقة محولات، منطقة قضبان التوزيع، منطقة خطوط النقل والتوزيع، منطقة محركات. والتقسيم إلى هذه المناطق يضمن نظام وقاية مناسب مما يقلل احتمالية قطع الخدمة إلى أقل وقت ممكن، والشكل9-33 يعطي رسم أحادي الطور لجزء من نظام قدرة تم تقسيمه إلى مناطق حماية اساسية مع ملاحظة أن كل منطقة تتداخل مع المنطقة المجاورة لتجنب وجود مساحات غير محمية، والتى تسمى بـ (مناطق عمياء).



الشكل 9-32 مناطق حماية مفتوحة (أ) ، ومغلقة (ب).



الشكل 10-33 تقسيم مكونات منظومة قدرة بسيطة إلى مناطق حماية Protection Zones .

9-9 الحماية الأساسية والحماية الساندة

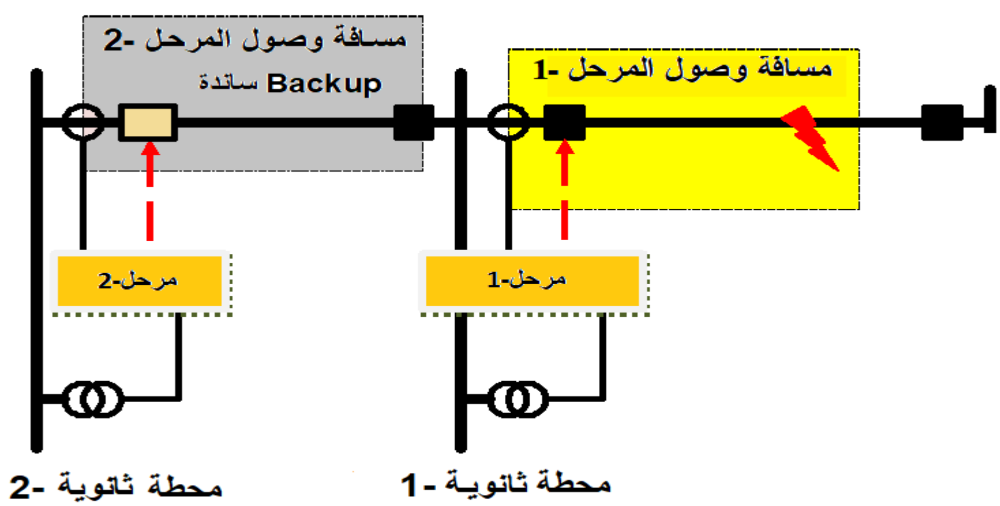
سبق وأن عرفنا معنى الحماية الأساسية بوصفها خط الدفاع الأول والحماية الساندة هي خط الدفاع الثاني في حالة فشل الأول في الاشتغال. ففي العموم يجب ان تؤمن حماية ساندة ثانية لكل عنصر من عناصر نظام القدرة لتأخذ دورها في حماية ذلك العنصر في حالة فشل الحماية الأساسية الأولى الخاصة به لسبب ما. ومن الناحية المثالية فان الحماية الأساسية والحماية الساندة يجب أن تكونا مستقلتين عن بعضهما البعض من ناحية مكوناتهما الأساسية مثل محولات التيار ومحولات الفولتية وقواطع الدائرة. كذلك يجب أن يكون زمن اشتغال الحماية الساندة أبطأ من الحماية الأساسية.

تكون الحماية الساندة بصورة عامة بنوعين: الحماية الساندة الموقعية Local backup والحماية الساندة البعيدة Remote backup . ويقصد بالموقعية هي تلك التي تكون مع الأساسية في المكان نفسه كأن تكون

في نفس المحطة الثانوية أو محطة التوليد. أما البعيدة فتكون في مكان آخر بعيد موقعياً عن الحماية الأساسية، أي في محطة ثانوية بعيدة مثلاً. ويبين الشكلان 9-34 و 9-35 مثالين لنوعي الحماية الساندة السالف ذكرهما.



الشكل 9-34 حماية اساسية مع حماية ساندة في الموقع نفسه (حماية ساندة موقعية أو محلية) .



الشكل 9-35 حماية ساندة بعيدة Remote back up protection لتشغيل المرحل العددي.

الفصل العاشر
حماية خطوط النقل -الطرق والأساليب

TRANSMISSION LINES PROTECTION-METHODES AND TECHNIQUES

1-10مقدمة

إن موضوع الحماية تم التطرق اليه في الفصل التاسع من هذا الكتاب حيث انتهى بمناقشة أنواع المرحلات المستخدمة في حماية الخطوط ومناطق الحماية وتقسيماتها. ولما كانت مرحلات الحماية بصورة عامة تعمل بتيارات وفولتيات قليلة جداً فمثلاً 5 أمبير للمرحلات التي تعمل بالتيار و 110 أو 120 فولت للمرحلات التي تعمل بالفولتية. لذلك وجب استخدام أجهزة أو أدوات تحويل لتحويل التيارات العالية الناتجة عن الأعطال وكذلك الفولتيات العالية للخطوط إلى قيم صغيرة تستطيع هذه المرحلات والأجهزة الملحقة بها تحملها. في هذا الفصل سيتم شرح أجهزة التحويل الخاصة بمرحلات الحماية قبل الشروع بعرض طرق حماية خطوط النقل. كذلك سيتم في هذا الفصل مناقشة الأساليب المختلفة لحماية خطوط النقل العلوية المعلقة overhead lines بأطوالها المختلفة بصورة عامة.

2-10 أجهزة التحويل (المحولات) Instrument Transformers

تستخدم أجهزة التحويل أو المحولات في قياس التيار والفولتية في أنظمة القدرة ذات الفولتية العالية وتوصيل الاشارات المقاسة إلي دوائر المرحلات ذات التيار المنخفض والفولتية المنخفضة أيضا. كذلك فهي تؤدي الوظائف الآتية:

1- عزل ملفات المرحلات عن دائرة الفولتية العالية
1- تغذية قيم قياسية للمرحلات من التيار (1 أو 5 أمبير) والفولتية (110 أو120) فولت للجهد.

وتكون محولات القياس المستخدمة في المشاريع الحمائية على نوعين:

- محولات التيار CT
- محولات الفولتية VT أو محولات الجهد PT

3-10 محولات التيار Current Transformers

يعد محول التيار من أهم الأجزاء المكونة في جميع منظومات الحماية ويقوم هذا المحول بتقليل التيارات العالية في دائرة الابتدائي إلى قيم صغيرة جداً في دائرة الثانوي. ومحول التيار يقوم أيضا بعزل دائرة الثانوي بضمنها مرحلات الحماية من الفولتية العالية في دائرة الابتدائي. أما دائرة الثانوي فتؤرض في نقطة

واحدة. وتجدر الإشارة إلى أن التيارات المقننة والمقررة لدائرتي الابتدائي والثانوي لمحول التيار تكون تلك القيم المؤشرة على لوحة التسمية Name plate (وهذا يطبق على أية كمية مقننة لجهاز آخر).كما أن أداء محول التيار المقنن يعطى كجزء من أو مضاعفات التيار المقنن (مثال على ذلك 20 مرة بقدر التيار المقنن). والمواصفات القياسية الدولية تعين مقدار تيار الابتدائي المقنن لحد 75 كيلو أمبير وتيار الثانوي المقنن هو 5 أمبير أو 1أمبير أما العبء على محول التيار فهو الحمل (بضمنه مقاومة أسلاك التوصيل) المربوط على أطراف دائرة الثانوي ويقدر بالأوم Ω أو الفولت أمبير VA عند تيار الثانوي المقنن. وهذه الصيغة الأخيرة تحسب عادة عند عامل قدرة متأخر 7. 0 بحيث يكون العبء مساوياً إلى خرج محول التيار نفسه. فمثلا فأن محول تيار اعتيادي قدرته المقننة 15 VA يكون العبء المناظر له 15 أوم لتيار مقداره 1 أمبير أو 0.6 أوم لمحول تيار ذي 5 أمبير.

4-10 تركيب محول التيار

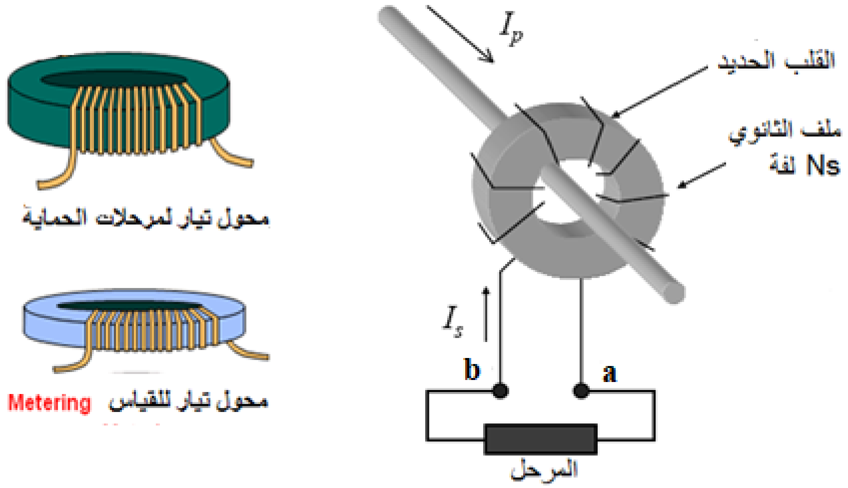
أن تركيب ونظرية عمل محول التيار تشابه تماما تركيب ونظرية عمل محولات القدرة الاعتيادية، لكن الفرق الأساسي هو أن محول القدرة يعد ثابت الفولتية. ويعد أيضاً جهازاً يعمل بالتوازي مع الدائرة. بينما محول التيار هو جهاز يعمل بالتوالي مع الدائرة وتياره يكون ثابتا (تحت أي ظروف تشغيل معطاة). أما القدرة بالفولت أمبير VA الداخلة في الدائرة بسبب وجود محول التيار عندما يتغير العبء بين قيم متطرفة لحالتي الدائرة المفتوحة وحالة الدائرة القصيرة على جهة الملف الثانوي، تكون صغيرة جداً وغير مهمة إذا ما قورنت مع ملايين الفولت ـ أمبير لمستوى القدرة التي يحدثها التيار الابتدائي . لذلك فإن التيار الابتدائي لا تتأثر قيمته بإدخال محول التيار في الدائرة بأي شكل من الأشكال نظراً لقيمته الكبيرة خلال العطل. وفي العموم يوجد نوعان رئيسيان من محولات التيار:

(1) محول ذو لفة واحدة للملف الابتدائي

(2) محول ذو ابتدائي متعدد اللفات

النوع الأول له ابتدائي تكون ملفات التيار فيه على شكل قضيب وهو موصل مستقيم متمركز الوضع ويعد جزء من منظومة القدرة (وقد يكون على سبيل المثال قضيباً للتوزيع) وليس بالضرورة أن يكون جزء من محول التيار نفسه. أما الثانوي فيلف بانتظام على محيط لب المحول الحديد وهذا بدوره يكون عادة على شكل حلقة من الحديد كما هو مبين في الشكل 10 -1 الذي يوضح رسماً تخطيطياً لمحول تيار بحيث أن الجزء (a) والجزء (b) يمثل رسم رمزي بكيفية توصيل المحول في الدائرة. لذلك فإن الفيض المتسرب من الابتدائي والثانوي كليهما يكاد يكون مهملا. ولأن الابتدائي يحتوي على لفة واحدة، يكون التيار الاسمي أو

المقنن حوالي 400 امبير أو أكثر لكي يجهز كمية من الأمبير- لفات إثارة كافية ليعطي خرجاً مناسباً بنسبة خطأ معقولة.



الشكل 10-1 تركيب محول التيار.

أما النوع الثاني فهو محولات التيار ذات الابتدائي الحاوي على لفات متعددة. وقد يحتوي الابتدائي على لفة واحدة أو أكثر وبسبب قلة عدد اللفات هذه فإنها عادة لا يمكن لفها بانتظام على اللب الحديد. إن مثل هذه المحولات تميل إلى تسريب فيض عالٍ منها، وتكون قلوبها عادة مصنوعة من رقائق صلب مقصوصة على أشكال الحروف T أو I أو E أو L .

وتصمم محولات التيار المستخدمة في القياس لغرض استعمالها مع أجهزة القياس ويتطلب منها إعطاء دقة عالية لجميع تيارات الحمل صعوداً إلى 125% من التيار المقنن. وتكون القلوب المصنوعة من النيكل والحديد هي المستخدمة بصورة رئيسية في صناعة محولات التيار المستخدمة للقياس، وذلك لأن الإنفاذية العالية التي يمتلكها هذا النوع من القلوب تجعل تيار الأثارة اللازم لها قليلاً بحيث يقلل مقدار الخطأ. كذلك فإن التشبع المطلق الذي يحدث تقريباً عند قيم واطئة نسبياً من كثافة الفيض (وكذلك فولتية الثانوي) يمنع من احتمال تغذية أجهزة القياس بتيار شديد أثناء حصول عطل في المنظومة. أما الفولاذ السليكوني والذي يكون عادة من نوع C.R.G.S.S فيستخدم لمحولات التيار المستخدمة في منظومات الحماية التي لا يجب أن تتشبع الحديد فيها حتى في حالات مرور تيارات عالية في الثانوي، عليه يجب أن تمتلك تيارات إثارة ونسبة خطأ معقولتين. والحد المضبوط لتيار الابتدائي يكون مؤشراً على لوحة القيم المقررة المثبتة على محول التيار ويكون هذا التيار أعلى قيمة لتيار الابتدائي والذي عنده يبقى محول التيار مشتغلاً ضمن دقة معلومة عندما يربط العبء المقنن عليه. وعندما يعبر عن هذا التيار بمضاعفات التيار المقنن فيسمى حينئذ بعامل حدود الدقة المقننة، والقيمة القصوى لهذا العامل تكون عادة بحدود 30.

وتختلف تصاميم وصناعة محولات التيار الخاصة بالحماية باختلاف الفولتية التي تعمل خطوط النقل عندها، فكلما كانت الفولتية العاملة عالية كلما كبر حجم محول التيار. ويوضح الشكل 10-2 أشكال لمحولات تيار تعمل بفولتيات عالية وعالية جداً.





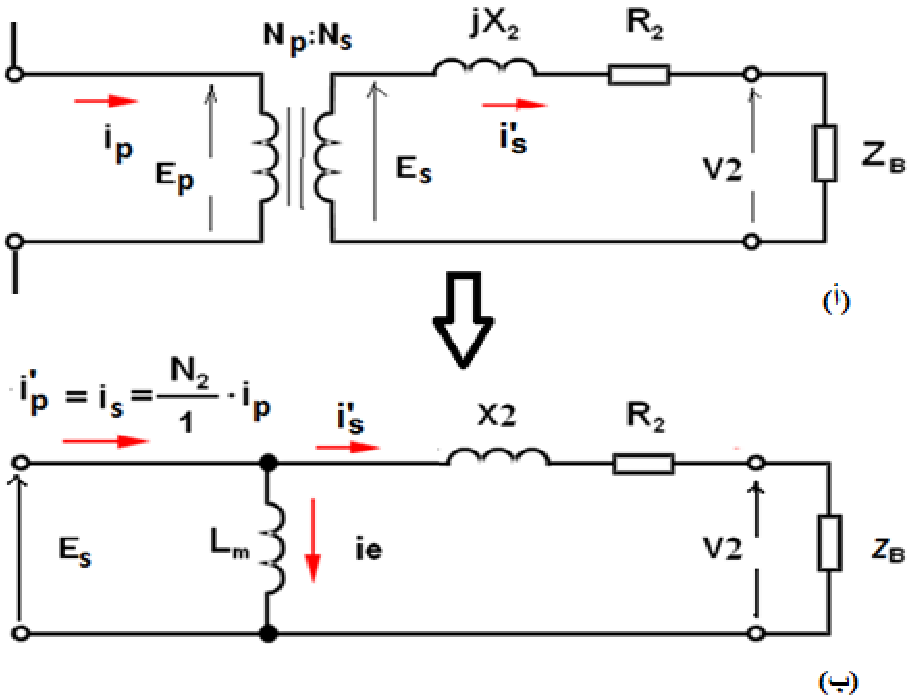
الشكل 10-2 محولات تيار تعمل بفولتيات عالية.

10-5 الدائرة المكافئة لمحول التيار

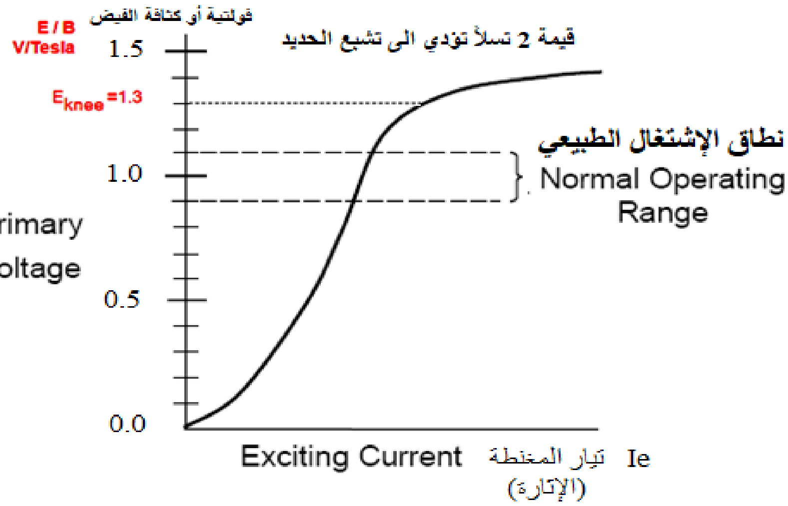
تأمل الآن الدائرة المكافئة لمحول تيار كما مبينة في الشكل 10-3 (أ) حيث يمكن هنا إهمال قيمة المقاومة R_1 والمفاعلة التسربية X_1 لملف الابتدائي لكونهما تؤثران فقط على الفولتية عبر طرفي الابتدائي. كذلك من المفيد وضع دائرة الإثارة المربوطة على التوازي على جهة الثانوي من المحول ويتم انساب كافة الكميات لهذه الجهة بحيث يمثل $I_s = I_P'$ تيار الابتدائي على جهة الثانوي من المحول كما مبين في الشكل 10-3 (ب). ومن I_P' يستخلص التيار I_e لإثارة أو توليد المجال المغناطيسي في قلب المحول الذي بدوره يحث فولتية E_s في الثانوي التي تكون مسؤولة عن سريان التيار I_s .

إن تيار الإثارة I_e هو السبب في حدوث خطأ في قياس التيار كما سنرى لاحقا، أما الخطأ الذي يحدث في زاوية الطور لمحول تيار ما فانه يحدث فقط عندما يكون تيار الابتدائي كبيرٌ جداً. حينئذ يحاول محول التيار إمرار تياراً مناظراً له في الملف الثانوي. وهذا يحتاج إلى ق. د. ك في الثانوي كبيرة ويحتاج أيضاً إلى كثافة فيض في اللب وتيار إثارة كبيرين. ويمكن الوصول إلى مرحلة بحيث أن أية زيادة أخرى في تيار الابتدائي فد تمتص كلها بازدياد تيار الإثارة نفسه وبالتالي لا تحدث أية زيادة تذكر في تيار الثانوي للمحول. مثل هذه المحولات للتيار يقال عنها بأنها متشبعة مغناطيسياً.

إن الدائرة البسيطة الموضحة في الشكل (3-10 (ب)) هي من الناحية العملية معقدة التحليل. حيث أن العلاقة بين E_s و I_e تكون لاخطية، (انظر الشكل4-10)، وعملية طرح I_e من I_s (أو I_p ') يجب أن تنفذ اتجاهياً، لكن علاقات الطور الضرورية قلما تكون معروفة حيث أن E_s هي حاصل ضرب التيار I_s في الممانعة الكلية لدائرة الثانوي و I_s هي كمية غير معروفة والتي يتطلب إيجاد قيمتها لتيار معين في دائرة الملف الابتدائي.



الشكل 3-10 الدائرة المكافئة التقريبية لمحول تيار.



الشكل 4-10 العلاقة بين E_s و I_e لمحول تيار تكون لاخطية.

تيار المغنطة I_e لا يمكن إيجاده هو الآخر إلا بمعرفة قيمة E_s . أما ممانعة العبء فتكون عادة غير ثابتة وهي دالة للتيار I_s ، لذا فإن معظم الكميات تكون مترابطة فيما بينها وبعض هذه العلاقات تكون في الغالب لاخطية .

وتجدر الإشارة إلى أن الأجهزة (مرحلات أو اجهزة قياس) التي تربط بدائرة الثانوي لمحولات التيار تسمى بالعبء burden و لا تسمى حمل load للتمييز بينهما وبين الأحمال في دائرة الابتدائي. ويعبر عن العبء بالأوم أو بالفولت أمبير ومعامل القدرة. ويلخص جدول 10-1 القيم القياسية للعبء لمحول ذي تيار معياري قدره 5 أمبير في الملف الثانوي.

جدول 10-1

تصنيف العبء	الفولت أمبير	الممانعة بالاوم	معامل القدرة
أعباء أجهزة القياس			
B - 0.1	2.5	0.1	0.9
B - 0.2	5.0	0.2	0.9
B - 0.5	n.5	0.5	0.9
B - 0.9	2.2-5	0.9	0.9
B - 1.8	45	1.8	0.9
الأعباء الخاصة بالمرحلات			
B-1	25	1.0	0.5
B-2	50	2.0	0.5
B-4	200	4.0	0.5
B-8	200	8.0	0.5

إن الشكل 10-4 يوضح منحنى تمغنط الدائرة المفتوحة لمحول تيار (حديد محولات التيار المستخدمة في الحماية يكون دائما من نوع C.R.G.O. S.S). من الواضح أن النفاذية تكون قيمتها قليلة عند قيم قليلة لكثافة الفيض. وتزداد إلى أقصى قيمة عند M وبعدها تقل في منطقة التشبع. والمسامحة اللاخطية $Y = I_e / E_s$ لدائرة الإثارة المربوطة على التوازي تتغير عكسيا مع النفاذية. ويتغير عامل القدرة لتيار الإثارة من حوالي 0.8 متأخراً عند إثارة منخفضة، إلى حوالي 0.6 متأخراً عند M ورجوعاً إلى حوالي 8. 0 متأخراً عند K وتؤخذ على هذا الأساس تؤخذ قيمة متوسطة مقدارها 0.7 متأخراً لعامل

القدرة. للأغراض العملية يقترب محول التيار من حالة التشبع عند K التي يطلق عليها نقطة الانحناء (الركبة). والتي تعرف على أنها تلك النقطة التي إذا ازدادت عندها الفولتية المسلطة بنسبة 10% تسبب زيادة في تيار الإثارة مقدارها 50%. من المهم هنا أن ندرك أنه في منطقة التشبع يحتوي تيار الإثارة على مركبات توافقية وذلك بسبب المسامحة اللاخطية لدائرة الإثارة نفسها وخاصة التوافقيات الثلاثية التي تتسبب في جعل صيغة موجة التيار متعددة الذرى. عليه فإن تيار الثانوي سوف لا تكون صيغته جيبيه أيضاً. تحت هذه الظروف من التشبع لا يمكن تطبيق المخطط الطوري الاعتيادي المعروف للمحول مباشرة لكون أن المخطط الطوري في هذه الحالة يمكن أن يمثل حالة الدائرة في تردد واحد فقط.

6-10 حساب اداء محول التيار CT Performance Calculations

ان أداء محول التيار يمكن حسابه باستخدام طريقتين :

1. طريقة المعادلة الأساسية لمكائن التيار المتناوب The formula method
2. طريقة منحنى التشبع المغناطيسي The saturation curve method

في طريقة المعادلة تستخدم المعادلة العامة لمكائن التيار المتناوب وهي:

$$E_s = 4.44 N_s f\ \emptyset_m$$

$$E_s = 4.44 N_s f\ B_m\ A$$

حيث :

E_s = فولتية الثانوي بالفولت

N_s = عدد لفات الثانوي

f = تردد المصدر (هرتز)

B_m = كثافة الفيض (تسلا)

A = مساحة المقطع العرضي لقلب المحول بالمتر المتربع

ويستخدم منحنى التشبع المغناطيسي المبين في الشكل 10-4 الذي يعطي العلاقة بين E_s و I_e للحصول على النسبة المئوية للخطأ في محول التيار والتي تعرف كالآتي:

$$C.T_{error} = \frac{I_s - I_s'}{I_s} \times 100\% = \frac{I_e}{I_s} \times 100\%$$

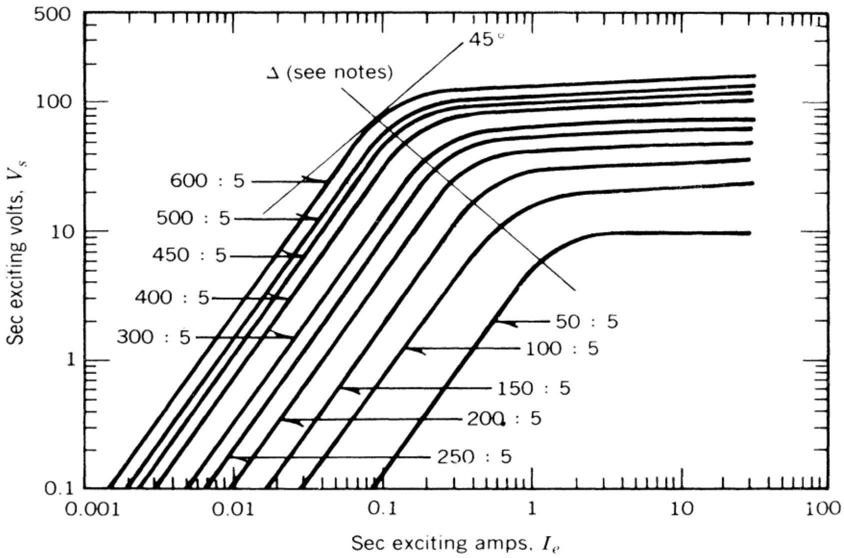
حيث أن $I_s - I_s' = I_e$

مثال محلول 10-1:

أفرض أن محول تيار CT ذو نسبة تيار مقررة 5/500 وممانعة الملف الثانوي $Z_2 = 0.242\ \Omega$. ممانعة العبء $Z_B = 0.351\ \Omega$. مساحة المقطع العرضي للقلب $A = 0.00193\ m^2$. يعمل المحول بتيار مقداره 10 kA ذي تردد مقداره 60 هرتز. فاذا علمت أن لب المحول مصنوع من الفولاذ (الصلب) السليكوني Silicon Steel المعطى خواصه في الشكل 10-5:

(أ) جد فيما إذا سيتشبع المحول مغناطيسيا أم لا ؟

(ب) احسب النسبة المئوية لمقدار الخطأ في هذه الحالة.



الشكل 10-5 منحنى التشبع المغناطيسي لحديد محولات تيار مصنوعة من الصلب السليكوني لها نسب تحويل مختلفة.

الحل: (أ) نحسب أولاً تيار الثانوي

$$I_s = 10{,}000\ \text{x}\ (5/500) = 100\ \text{A}$$

وإذا أهملنا تيار الإثارة I_e فإن

$$I_s' \approx I_s = 100\ \text{A}$$

$$E_s = I_s\ (Z_B + Z_2)$$

$$= 100\ \text{x}\ (0.351 + 0.242) = 59.29\ \text{V}$$

$$E_s = 4.44 \times f \times N_2 \times A \times B_m$$

$$\therefore \quad B_m = \frac{59.29}{4.44 \times 60 \times \frac{500}{5} \times 0.001935} = 1.15T$$

نحن نعرف أن الحديد الصلب السليكوني يتشبع مغناطيسيا بكثافة فيض مقدارها 1.2 تيسلا لذلك فان المحول في هذا المثال سوف لا يتشبع لأن كثافة الفيض المتولدة فيه عن مرور تيار مقداره 10 كيلو أمبير هي 1.15 تيسلا.

ولحساب نسبة الخطأ المئوية يجب الرجوع الى منحنيات التشبع المغناطيسي المبينة في الشكل 10-5 الذي يبين العلاقة بين E_s و I_e . فمن هذا المنحنى يكون I_e المناظر للفولتية $E_s = 59.29$ فولت هو 0.1 أمبير. لذا تكون نسبة الخطأ المئوية للمحول:

$$CT_{\text{الخطأ}}\ \% = \frac{I_e'}{I_s} \times 100\% = \frac{0.1}{100} \times 100\% = 0.1\%$$

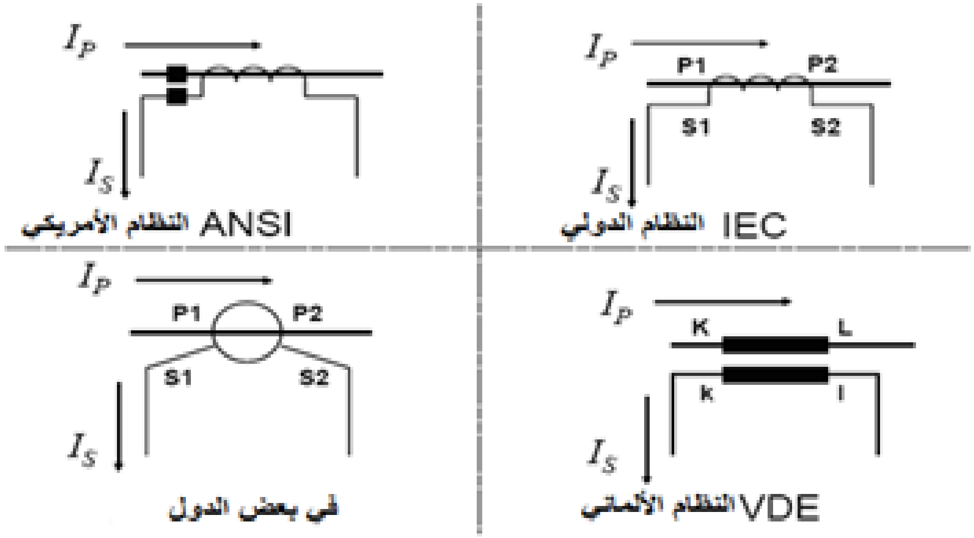
إن التيار I_e يدعى بالخطأ المتراكم لمحول التيار عندما يقاس أو يعبر عنه بالنسبة المئوية في حدود دقة تيار الثانوي (I_S) . ولما كانت مركبات I_e هي السبب في خطأ التيار والطور فان أي واحد من هذه الأخطاء لا يمكن أن يزيد على الخطأ المتراكم. ولما كان عامل القدرة $cos\emptyset_o$ لدائرة الإثارة غير معلوم عادةً فإنه يمكن أن يكتفى بحساب خطأ التيار للمحول في أغلب الحالات العملية.

7-10 فولتية الدائرة المفتوحة لمحول التيار Current transformer open circuit voltage

القاعدة العامة للمحول هي عدم فتح دائرة الملف الثانوي طالما يمر تيار في الملف الابتدائي؛ لأنه عندما يمر تيار في الملف الابتدائي سوف يولد فيضاً عالي القيمة في القلب مما يسبب تشبعه وبذلك تتكون فولتية غير اعتيادية على طرفي الملف الثانوي قد تسبب في انهيار العزل وكذلك خطورة على الأشخاص أيضًا. وهناك سبب آخر وهو امكانية وجود الفيض المتبقي residual magnetism في القلب الحديد حتى بعد إزالة الفولتية مما يؤثر على دقة المحول.

8-10 الرموز الدولية لمحول التيار

يبين الشكل10-6 الرموز الدولية المتفق عليها لمحولات التيار في عدة دول للفائدة. وسيتم استخدام الرمز المتفق عليه في النظام الدولي IEC في عموم هذا الكتاب وهو تقريبا الرمز المستخدم في النظام القياسي البريطاني BS نفسه.



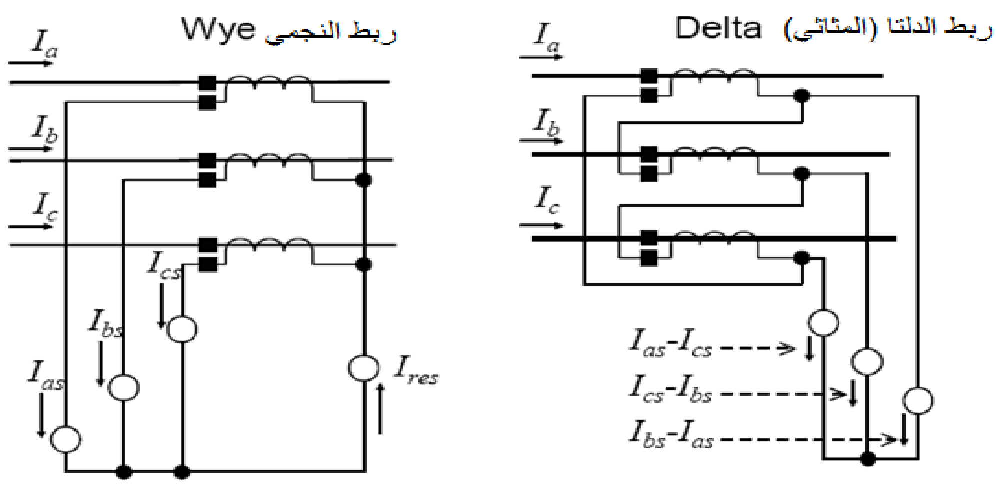
الشكل 10-6 رموز محول التيار في مختلف الأنظمة الدولية.

10-9 طرق ربط محولات التيار في الدوائر

هناك نوعان شائعان من ربط محولات التيار:

- الربط بصيغة الدلتا (المثلثي)
- الربط النجمي (على شكل حرف Y)

يبين الشكل 10-7 (أ) ربط الدلتا حيث تكون التيارات الداخلة للمرحلات عبارة عن الفرق بين تيارات الاطوار في ثانوي المحولات، بينما في الشكل 10-7(ب) الذي يبين الربط انجمي تكون التيارات المارة في المرحلات هي نفسها التيارات المارة في الثانوي للمحولات.



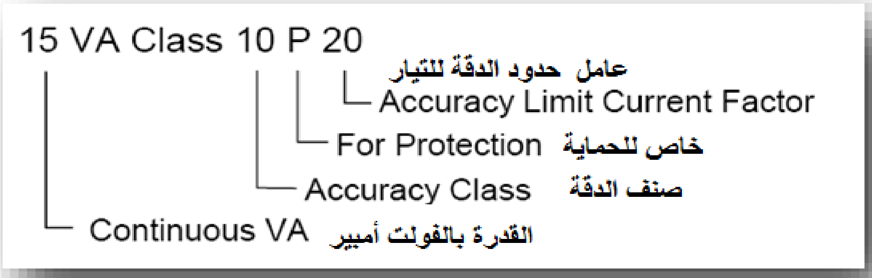
الشكل – 10-7 أساليب ربط محولات التيار في الدوائر: (أ) الربط المثلثي ، (ب) الربط النجمي.

10-10 الخصائص الميكانيكية والحرارية لمحولات التيار

بجانب دقة المحولات فان الخصائص الميكانيكية والحرارية يلزم معرفتها عند اختيار المحولات وذلك لأنه عند حدوث القصر يمر تيار عالي القيمة في الدائرة ويصاحب ذلك تأثير حراري وميكانيكي على المحول. والقوى المتولدة في المحول لحظة حدوث عطل الدائرة القصيرة تتناسب مع مربع عدد لفات الملف الابتدائي، وبزيادة قيمة الأمبير- لفات Ampere turns بهدف زيادة الدقة سوف تقل المقاومة الميكانيكية. أما بالنسبة للسعة الحرارية فهي تعتمد على مقطع السلك وطوله وعدد لفات كلا من الملف الابتدائي والثانوي وزمن مرور تيار القصر وبزيادة المقطع العرضي للموصل سوف ترتفع السعة الحرارية.

11-10 التصنيف والدقة لمحولات التيار CT Classes and accuracies

يعطي الجدول 10-2 نسب الخطأ في محولات التيار وتصنيفها بموجب هذه النسبة. والنظام الدولي الكهربائي IEC يوصف محولات التيار كالآتي:



ويقصد بعامل حدود الدقة هو ان الشركة الصانعة لا تضمن الدقة المعطاة للمحول إذا زاد التيار فيه عن 20 مرة بقدر التيار المقنن له .

الجدول 10-2 فئات الدقة لمحولات التيار.

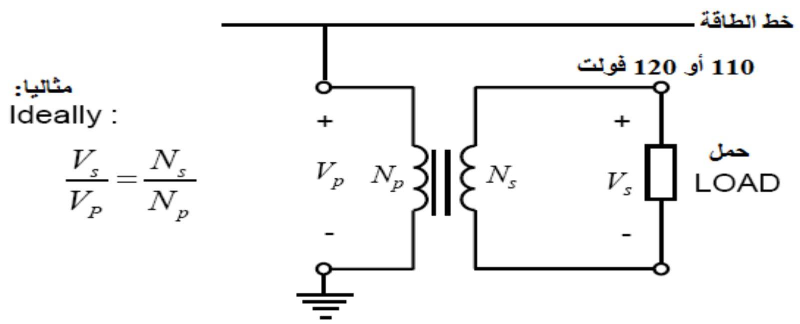
Class الصنف	النسبة المئوية للخطأ % Error	التطبيقات العملية
0.1	0.1 ±	محول تيار للقياس Metering
0.2	0.2 ±	
0.5	0.5 ±	
1.0	1.0 ±	
5P	1 ±	محول تيار حماية Protection
10P	3 ±	

أمثلة : محول تيار للقياس 15VA Class 0.5

محول تيار للحماية 15VA Class 5P 20

12-10 محولات الفولتية Voltage transformers

وتسمى أيضا بمحولات الجهد Potential transformer، وتصمم محولات الفولتية على أساس أن توضح بين خط القدرة والأرض أو بين خطين، وتستخدم لتغذية أجهزة قياس الفولتية أو التحكم أو الملف الخاص بالفولتية في أجهزة قياس القدرة الكهربائية. ونسبة التحويل للملف الابتدائي إلى الثانوي تكون بحيث تعطي قيمة للفولتية في الملف الثانوي تساوي 120 أو 110 فولت ويوضح الشكل 10-8 رسم توضيحي لأحد هذه المحولات.



الشكل 10-8 محول فولتية ذو الملفين.

تستخدم محولات الفولتية ذات الملفين (النوع الكهرومغناطيسي Electromagnetic types) الموضحة في الشكل 10-8 للفولتيات المنخفضة والمتوسطة كليهما. أما المحولات التي تستخدم للفولتيات العالية والفائقة فتكون بأحد الأنواع التالية:

1- النوع التعاقبي Cascade type

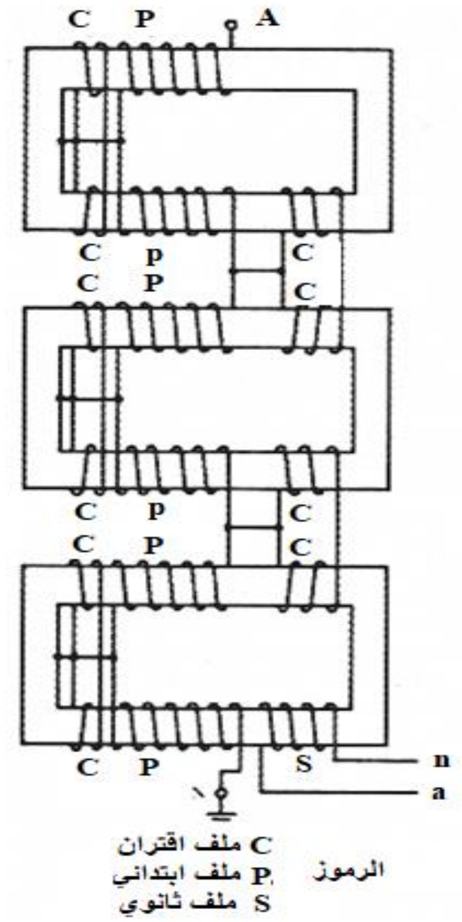
يبين الشكل 10-9 محول فولتية ذو ست مراحل، وغالبًا يستخدم هذا المحول في الفولتيات أكثر من 145 كيلو فولت ويلاحظ أن الملف الابتدائي تم تقسيمه على عدة قلوب مغناطيسية بينما الملف الثانوي موجود فقط على لب واحد - المرحلة الأخيرة.

2- محولات الفولتية ذات المتسعات المتقارنة (المزدوجة)

Capacitive-coupled Voltage Transformers (CCVT)

تركيب هذا النوع يعتمد أساسا على فكرة مجزئ الفولتية باستخدام المتسعات (المكثفات) كما موضح في الشكل 10-10 حيث يتم تخفيض الفولتية العالية بالتدريج باستخدام متسعات مربوطة على التوالي إلى قيمة مناسبة يمكن بعدها استخدام محول اعتيادي ذي ملفين للحصول على فولتيات تناسب أجهزة القياس أو

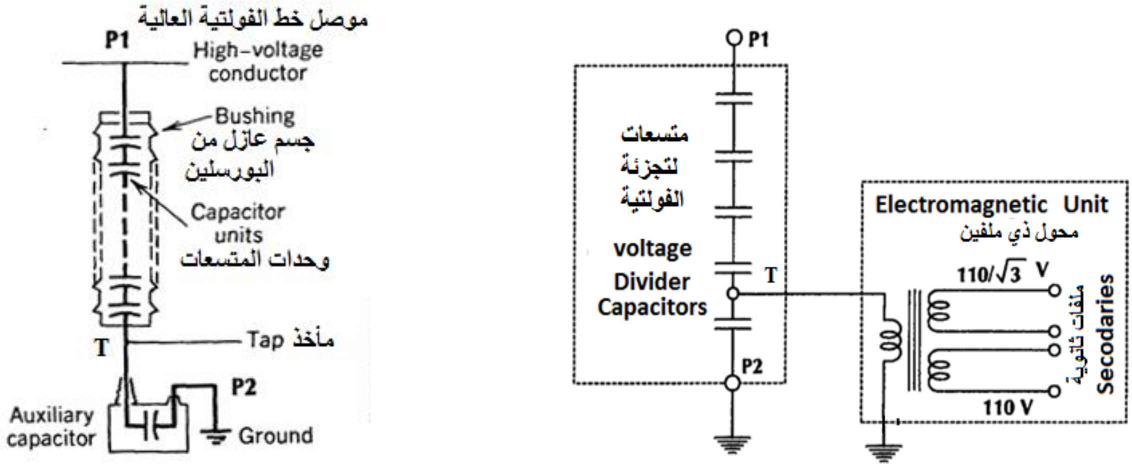
مرحلات الحماية، أنظر الشكل 10-10 (أ). أما وحدات المتسعات فيتم وضعها داخل جسم عازل يصنع من مادة البورسلين (الخزف) ذي عازلية كهربائية عالية ليتحمل الفولتيات العالية ويسمى هذا الجسم العازل الخزفي بالجلبة Bushing، أنظر الشكل 10-10 (ب) و (جـ). هذه المحولات تستخدم عادة لفولتيات من 220 kV فما فوق.



الشكل 10-9 المحول التعاقبي للفولتيات العالية.

3- محولات الفولتية المغناطيسية - الضوئية Magneto-optic voltage transformers

ظهرت هذه المحولات في نهاية القرن الماضي وهي عبارة عن محولات طاقة transducers للتيار والفولتية. وتمتاز هذه المحولات بقلة استهلاكها للطاقة. وتعتمد نظرية اشتغالها على مبدأ تأثير فاراداي Faraday Effect وتسمى محولات التيار من هذا النوع محولات التيار المغناطيسية - ضوئية MOCT ومحولات الفولتية المغناطيسية - الضوئية MOVT وتستخدم عادة للفولتيات العالية جداً والفائقة.



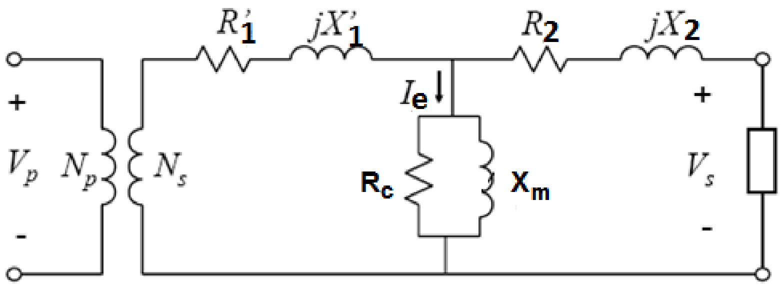
(ب) (أ)

الشكل 10-10 محولات الفولتية ذات المتسعات المتقارنة المتعاقبة.

10-13 الدائرة المكافئة لمحول الفولتية ذي الملفين

Electromagnetic transformer equivalent circuit

الشكل 10-11 يعطي مخطط الدائرة المكافئة لمحول فولتية اعتيادي ذو ملفين منسوبة الى دائرة الثانوي. هذه الدائرة تشبه إلى حد كبير الدائرة المكافئة لمحول التيار ذو الملفين التي جرت دراستها في الفقرات السابقة.



الشكل 10-11 الدائرة المكافئة لمحول ذو ملفين .

10-13-1 الخصائص الميكانيكية والحرارية

حيث أن محولات الفولتية تصل بين خط القدرة والأرض أو بين خطين فهي سوف لا تتعرض لتأثيرات حرارية وميكانيكية مماثلة لما يحدث في محولات التيار. لكن هناك احتمال تعرضها لقصر في الملف الثانوي، وإذا استخدمت المصهرات في الدائرة الثانوية لحمايتها سوف يزيد ذلك من الحمل عليها لذلك يفضل استخدام المصهرات في الملف الابتدائي حيث يكون لذلك تأثير طفيف على الدقة.

2-13-10 تحميل محولات الفولتية (العبء) Voltage transformer burden

يعرف العبء على المحول بكونه كل ما يتصل بالملف الثانوي من أسلاك وأجهزة مثل مرحلات الحماية وغيرها، ويعبر عنه عادة بالفولت – أمبير. ويبين الجدول 10-3 مقدار التحميل ومعامل القدرة لبعض الحالات حسب المواصفات الأمريكية ANSI للأجهزة والمعدات. كذلك يحدد للمحول حمل حراري Thermal burden وهو يساوي الفولت أمبير الذي يمر خلاله من غير أن تتجاوز درجة الحرارة الحد المسموح به .

3-13-10 الدقة Accuracy

بسبب المقاومة الموجودة في ملفات لمحول الفولتية، ينتج هناك فقد في القدرة الكهربائية مما ينجم عنه ارتفاع في درجة حرارة الملفات. كذلك فان نسبة فولتية الملف الابتدائي إلى فولتية الملف الثانوي لا تكون مماثلة تمامًا لنسبة عدد لفات الملف الابتدائي إلى الثانوي. وهذا يعرف بخطأ النسبة Ratio error .

الجدول 10-3 مقدار التحميل ومعامل القدرة حسب المواصفات الأمريكية ANSI للأجهزة والمعدات.

العبء Burden	الفولت امبير لـ 120 فولت Volt-amp. at 120 V	عامل قدرة العبء Burden P.F
W	12.5	**0.1**
X	25	**0.7**
Y	75	**0.85**
Z	200	**0.85**
Z2	400	**0.85**
M	35	**0.2**

هذا بالإضافة أيضًا إلى أن جزء من التيار يستخدم في مغنطة اللب الحديد للمحول. وهناك أيضًا فقد في القدرة في اللب الحديد نفسه، لذلك فالزاوية بين الفولتيات للملف الابتدائي والملف الثانوي ليست 180 درجة تماماً أي أن هناك خطأ في زاوية الطور أيضاً. هذا الخطأ الأخير لا يؤخذ بعين الاعتبار في الدوائر ذات معامل قدرة يساوي الواحد أو التي تغذي أجهزة قياس أو تحكم. أما الخطأ العام الذي يبديه محول الفولتية بالنسبة المئوية فيمكن حسابه من المعادلة التالية:

$$VT_{Error} = \{(n\ V_s - V_p)\ /\ V_p\}\ x\ 100\%$$

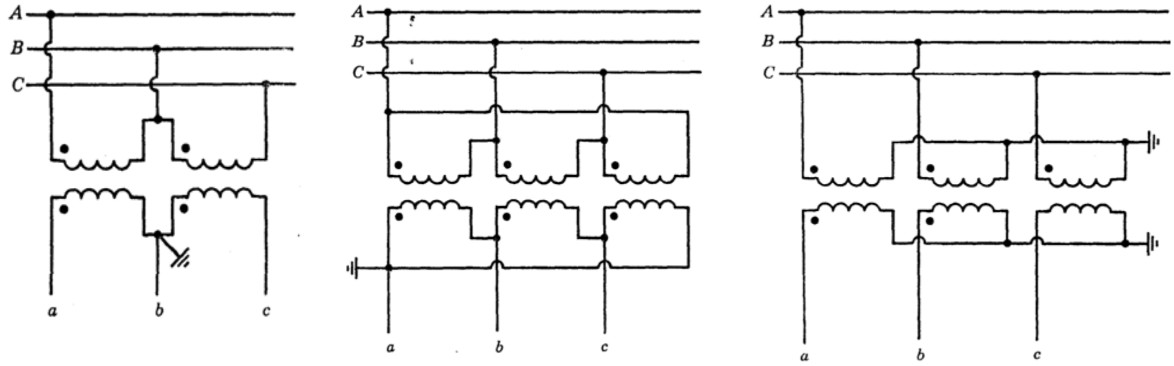
ويعطي الجدول 10-4 معدلات حدود الخطأ القياسية لمحولات الفولتية للفائدة.

14-10 أساليب ربط محولات الفولتية

تربط محولات الفولتية في المنظومات ذات الأطوار الثلاثة بأحد الأساليب التالية:

1- الربط النجمي – نجمي 2- الربط المثلثي أو الدلتا 3- الربط المثلثي (الدلتا) المفتوح

ويبين الشكل 10-12 أساليب الربط المذكورة في أعلاه.



(أ) الربط النجمي - نجمي (ب) الربط المثلثي -المثلثي (جـ) ربط المثلثي المفتوح

الشكل 10-12 أساليب ربط محولات الفولتية للدوائر ثلاثية الطور.

جدول 10-4 حدود الخطأ في محولات الفولتية.

الصنف **Class**	فولتية الإبتدائي **Primary voltage**	خطأ الفولتية **Voltage error (%±)**	خطأ الزاوية(الطور) **Phase error (min±)**
0.1	V_n , 1.0 V_n and 1.2 V_n 0.8	0.1	0.5
0.2		0.2	10.0
0.5		0.5	20.0
1.0		1.0	40.0
0.1	V_n 0.5	1.0	40.0
0.2		1.0	40.0
0.5		1.0	40.0
1.0		2.0	80.0
0.1	V_n	0.2	80.0
0.2		2.0	80.0
0.5		2.0	80.0
1.0		3.0	120.0

V_n هي الفولتية الإسمية المقررة.

10-15 حماية خطوط نقل الطاقة الكهربائية – الطرق والأساليب

في الفصل التاسع من هذا الكتاب تم التعريف بأنواع الأعطال التي يمكن حدوثها علي خطوط نقل الطاقة الكهربائية وكيفية تأثر الفولتية و التيار الكهربائي بهذه الأعطال. في هذا الفصل سيتم عرض بعض الطرق المستخدمة في حماية الخطوط الكهربائية وكذلك دراسة لمكونات أجهزة الحماية و الطرق الحسابية المستخدمة لضبط قيم و ثوابت هذه الأجهزة.

يعتمد اختيار طريقة حماية خطوط النقل على طول الخط نفسه وترتيب وضعه في الشبكة أو النظام، إلا أن الطرق المستخدمة في حماية الخطوط يمكن تلخيصها بالآتي:

1- حماية خطوط النقل بنظام زيادة التيار Overcurrent Protection

2- حماية خطوط النقل بنظام الأسلاك الدليلية أو المرشدة

3- حماية خطوط النقل بنظام الأمواج المحملة على الخط نفسه (الحماية الحاملة)

4- حماية خطوط النقل بنظام طول المسافة (الحماية المسافية)

وسيتم مناقشة هذه الطرق بالتفصيل في الفقرات التالية من هذا الفصل وكذلك الفصل الحادي عشر القادم.

10-15-1 حماية خطوط النقل بنظام زيادة التيار Overcurrent Protection

مرحلات التيارات الفوقية

تعد الحماية من التيارات الزائدة أو الفوقية من أسهل وأرخص أنواع الحماية التي استخدمت ولا زالت تستخدم لحماية خطوط النقل والمحولات والمولدات وغيرها من المعدات الكهربائية المهمة في منظومات القدرة حيث تطورت نظم الحماية الأساسية على مبدأ قيم التيارات الزائدة التي تنتج عن حدوث أعطال. وقد استخدمت أنواع عديدة من مرحلات خاصة تعتمد جميعها على خصائص العلاقة بين التيار والزمن التي عادة ما تعرف بالعلاقة الزمن بالتيار (منحنى الزمن-التيار) حيث تقسم هذه المرحلات الى ثلاثة أنواع رئيسية:

- مرحل لحظي Instantaneous relay
- مرحل معتمد على الزمن ويكون على نوعين:

- مرحل ذو زمن تأخير محدد Definite time - lag relay

- مرحل ذو زمن تأخير عكسي Inverse time - lag relay

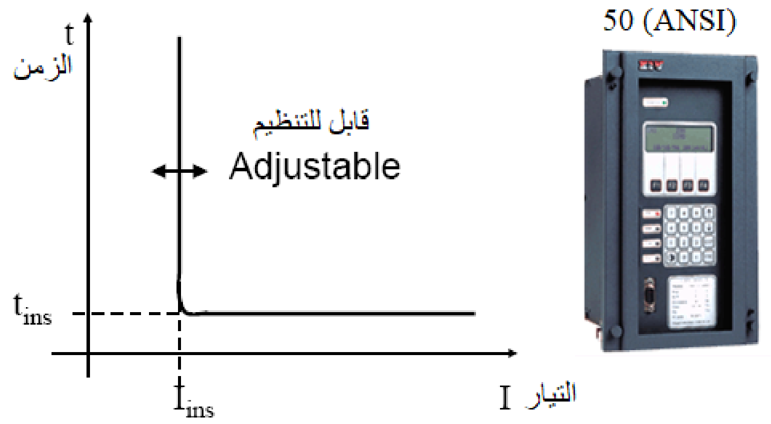
- مرحل بخصائص مختلطة:

لحظي + تأخير زمني عكسي + تأخير بزمن محدد

وفيما يأتي شرح لخواص ومميزات هذه الأنواع من المرحلات:

1- مرحلات زيادة التيار اللحظية Instantaneous Overcurrent Relays(50,50N)

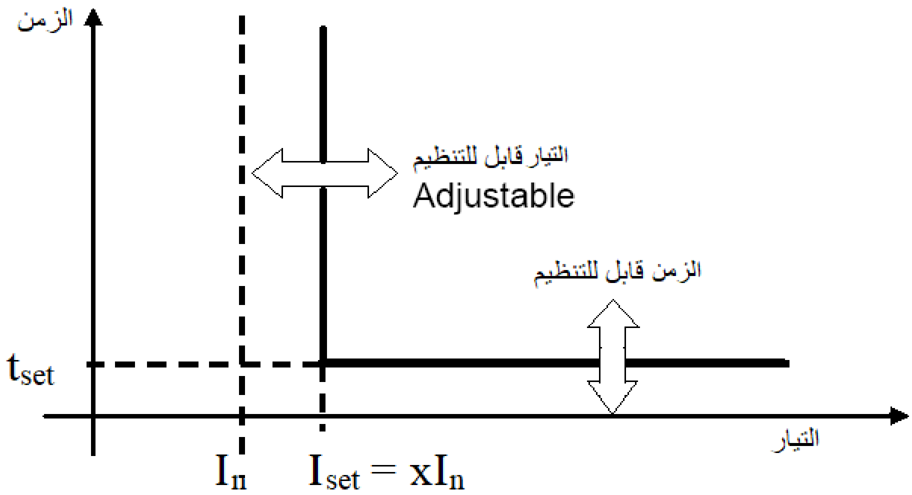
تعمل هذه المرحلات بصورة لحظية أو فورية بدون أي تأخير زمني (زمن التشغيل = 0.1 ثانية).
ابسط أنواع هذه المرحلات هي مرحلات الجذب المغناطيسي والمرحلات الستاتيكية والمحوسبة الرقمية والمحوسبة العددية. كل هذه الأنواع ممكن استخدامها كمرحلات لحظية. ويبن الشكل 10 –13 خصائص الزمن- التيار لهذا النوع من المرحلات.



الشكل 10- 13 خصائص الزمن- التيار للمرحل اللحظي.

2- مرحل تيار فوقي يعمل بزمن تأخير محدد Definite-Time Overcurrent Relays

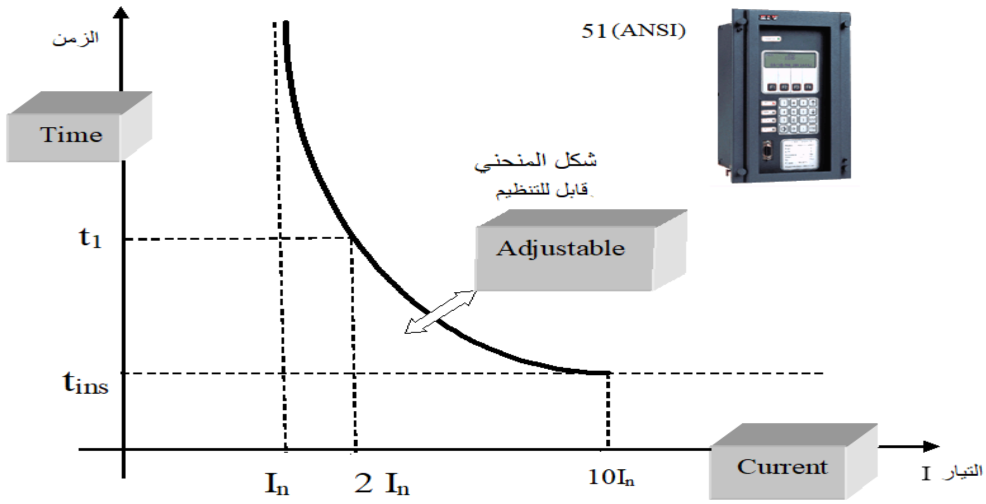
يعمل هذا النوع من المرحلات بتأخير زمني بسيط يمكن تنظيمه سوية مع عتبة التيار الذي يعمل به المرحل، ويبين الشكل 10- 14خواص الزمن - التيار لهذ النوع من المرحلات.



الشكل 10- 14 خواص الزمن - التيار لمرحل تيار فوقي يعمل بزمن تأخير محدد.

3- مرحل يعمل بزمن تأخير عكسي Inverse time - lag relay

في هذا النوع من المرحلات يعتمد زمن اشتغالها على قيمة التيار ويكون عموماً بتناسب عكسي أي أن زمن الاشتغال يكون قليلاً كلما كان التيار كبيراً. ويبين الشكل 10- 15 خصائص الزمن التيار لهذا المرحل. ويكون للمرحل قيمتان للتنظيم وهما ضبط قيمة تيار اللقط وتنظيم شكل أو مستوى انحناء المنحني. وفي الأنواع القديمة من المرحلات الكهرومغناطيسية يزود المرحل بزر تنظيم دوار Dial لذلك يسمى التنظيم بضبط تنظيم الزر Time Dial Setting في المرحلات المصنعة في أميركا الشمالية.



الشكل 10-15 خواص الزمن - التيار لمرحل تيار فوقي يعمل بزمن تأخيرعكسي.

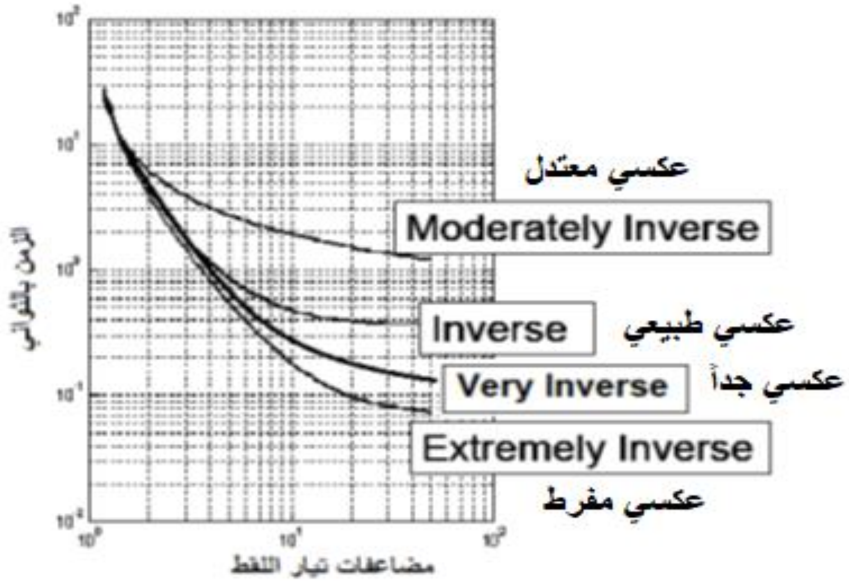
4- درجات الإنحناء والخواص العكسية للمنحنيات Degrees of Inverse Curves

هناك اربعة أنواع شائعة الاستخدام للمنحنيات العكسية في مرحلات التيار الفوقي التي تعمل بزمن تأخير عكسي وهي كما مبينة في الشكل 10-16:

- Moderately inverse إنحناء عكسي معتدل
- Inverse (Normal) إنحناء (عكسي) طبيعي
- Very inverse إنحناء عكسي جداً
- Extremely invers إنحناء عكسي مفرط

والمرحلات الكهرومغناطيسية النموذجية العملية التي تعطي خواص الزمن العكسي المشهورة هي :

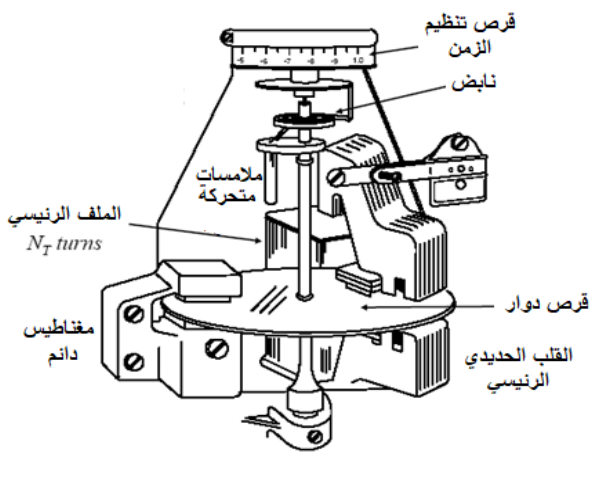
- مرحل تيار فوقي من نوع القرص الحثي Induction disc overcurrent relay الشكل 10- 17 (أ) .
- مرحل تيار فوقي من نوع القطب المظلل Shaded-Pole Induction overcurrent relay الشكل 10-17(ب) .



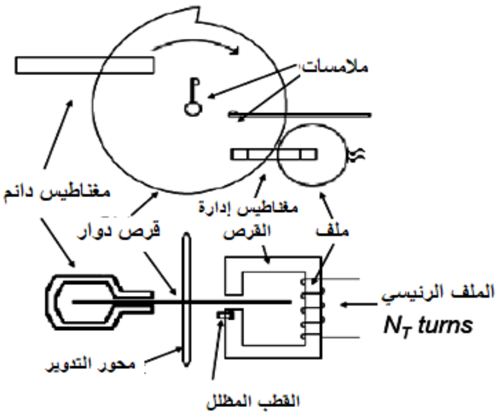
الشكل 10-16 درجات المنحنيات العكسية في مرحلات التيار الفوقي التي تعمل بزمن تأخير عكسي.

وتجدر الإشارة الى أن مرحلات التيار الفوقي الزمنية (ANSI- 51) لها تنظيمان :

- ❖ تنظيم تيار اللقط
- ❖ تنظيم زمن التأخير



(أ)



(ب)

الشكل 10- 17مرحلات كهرومغناطيسية نموذجية عملية تعطي خواص الزمن العكسي:

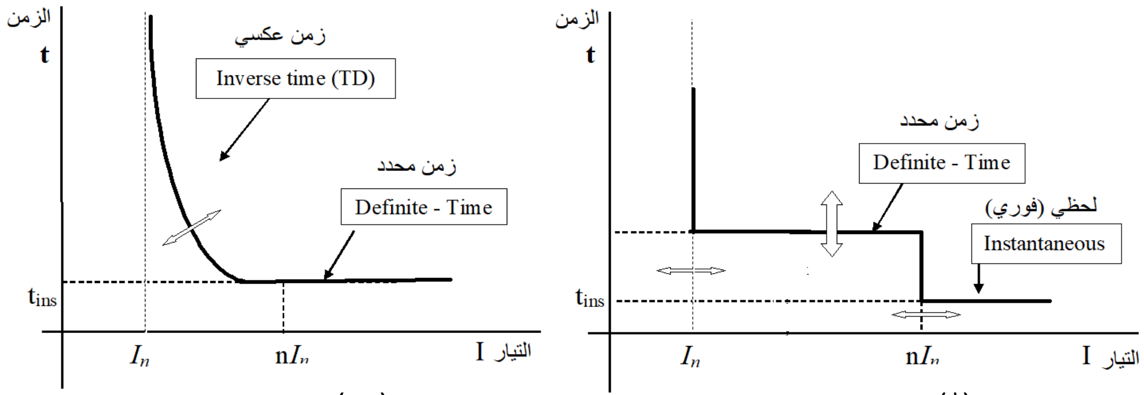
(أ) مرحل تيار فوقي من نوع القرص الحثي، (ب) مرحل تيار فوقي من نوع القطب المظلل.

5- مرحلات تيار فوقي بخصائص مختلطة Mixed Curves Overcurrent Relays

تتضمن هذه المرحلات محاسن مختلف أنواع مرحلات التيار الفوقي التي مر ذكرها سلفاً؛ فهي توفر الحماية من التيارات الفوقية باستخدام:

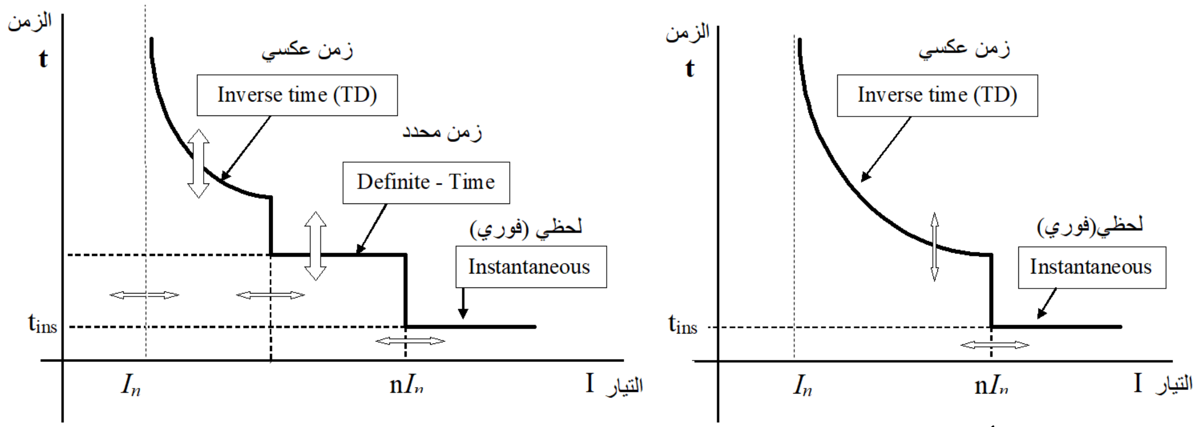
- مزيج من الحماية اللحظية والحماية بتأخير زمني محدد، أو
- مزيج من الحماية بتأخير زمني محدد والحماية بزمن تأخير عكسي (IDMT)، أو
- مزيج من الحماية اللحظية والحماية بزمن تأخير عكسي، أو
- مزيج من الحماية اللحظية والحماية بتأخير زمني محدد والحماية بزمن تأخير عكسي.

هذه الخواص المختلطة مبينة في الرسوم المعطاة في الشكلين 10-18 و10-19.



(ب) (أ)

الشكل 10- 18 (أ) مزيج من الحماية اللحظية والحماية بتأخير زمني محدد، (ب) مزيج من الحماية بتأخير زمني محدد والحماية بزمن تأخير عكسي (IDMT).



(ب) (أ)

الشكل 10-19 (أ) مزيج من الحماية اللحظية والحماية بزمن تأخير عكسي، (ب) مزيج من الحماية اللحظية والحماية بتأخير زمني محدد والحماية بزمن تأخير عكسي.

تكملة الفصل العاشر

6- المرحلات الحثية ذات ميزات التأخير الزمني العكسي الأدنى المحدد:

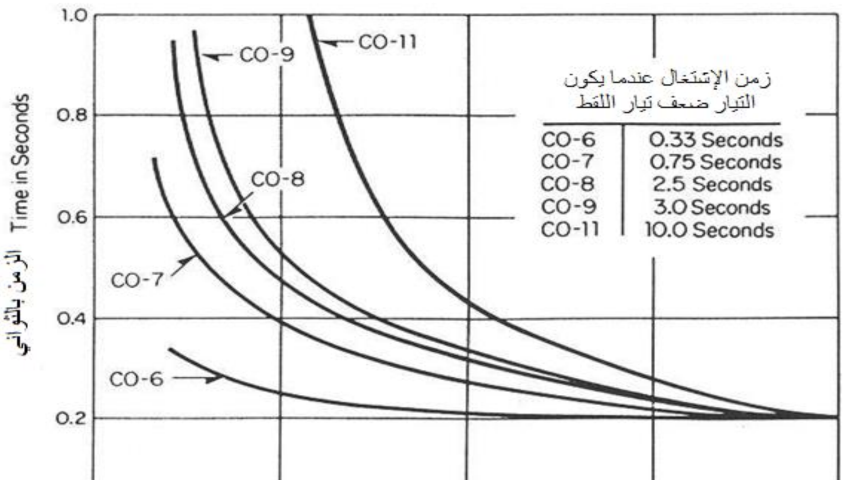
INVERSE DEFINITE MINIMUM TIME LAG INDUCTION RELAYS (I.D.M.T.L)

هذه المرحلات ذات الزمن المتدرج هي من أكثر أنواع المرحلات التي تستخدم لحماية خطوط النقل للفولتية المتوسطة وعادة تكون من نوع القرص الحثي أو القطب المظلل اللذان تمت مناقشتهما في الفقرة السابقة. وتصنع هذه المرحلات بموجب نظامين عالميين مختلفين هما النظام الأميركي والنظام الدولي أو البريطاني حيث تختلف طرق الضبط والتنظيم في كلا النظامين وكذلك خواص المرحلات في أوربا وبريطانيا نفسها، لكن غرضهما واحد وهو الحماية من التيارات الفوقية.

1- المرحلات الحثية ذات ميزات التأخير الزمني العكسي الأدنى المحدد المصنعة وفق النظام الأميركي تكون على خمسة أنواع، وخصائص الزمن – التيار وأرقامها هي كالآتي:

- Definite minimum, CO-6 الزمن المحدد الأدنى
- Moderately inverse,CO-7 العكسي المعتدل
- Inverse, CO-8 (الطبيعي) العكسي
- Very inverse, CO-9 العكسي جدا
- Extremely inverse, CO-11 العكسي المفرط
-

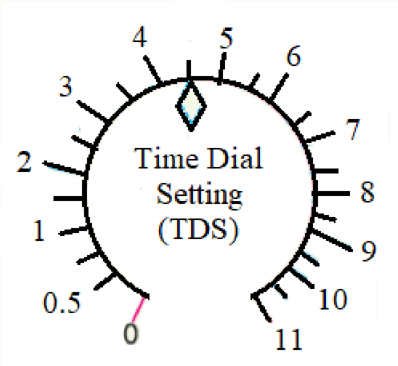
خصائص الزمن التيار لهذه المرحلات موضحة في الشكل 10-20 لغرض المقارنة حيث يلاحظ أن جميع هذه المرحلات تعمل بزمن مقداره 0.2 ثانية عند تنظيم ضبط مأخذ مضاعفات تيار اللقط فيها Tap setting على مضاعف قدره 20 (المحور الأفقي).



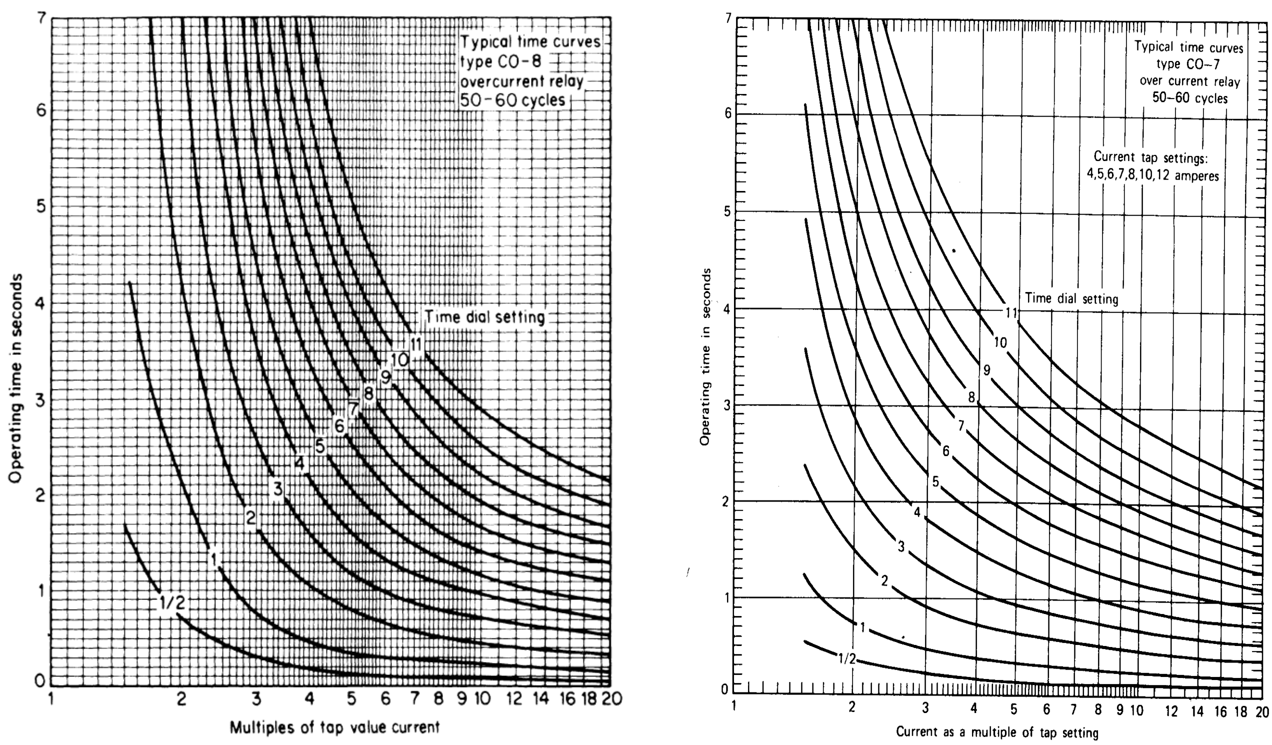
الشكل 10-20 خواص الزمن – التيار للمرحلات الأميركية الصنع.

في المرحلات الأميركية هذه يمكن ضبط خواص الزمن التيار بواسطة زر ضبط الزمن TDS ويكون من 0.5 إلى 11 بتدرج 1 كما موضحة في الشكل 10-21 .

كما يوضح الشكل 10-22 خواص بعض المرحلات الأميركية الصنع للمقارنة.



الشكل 10-21 زر(مزولة) تنظيم الزمن TDS أو اختيار درجة انحدار المنحني في النظام الأمريكي.



(ب) المرحل CO8 (أ) المرحل CO7

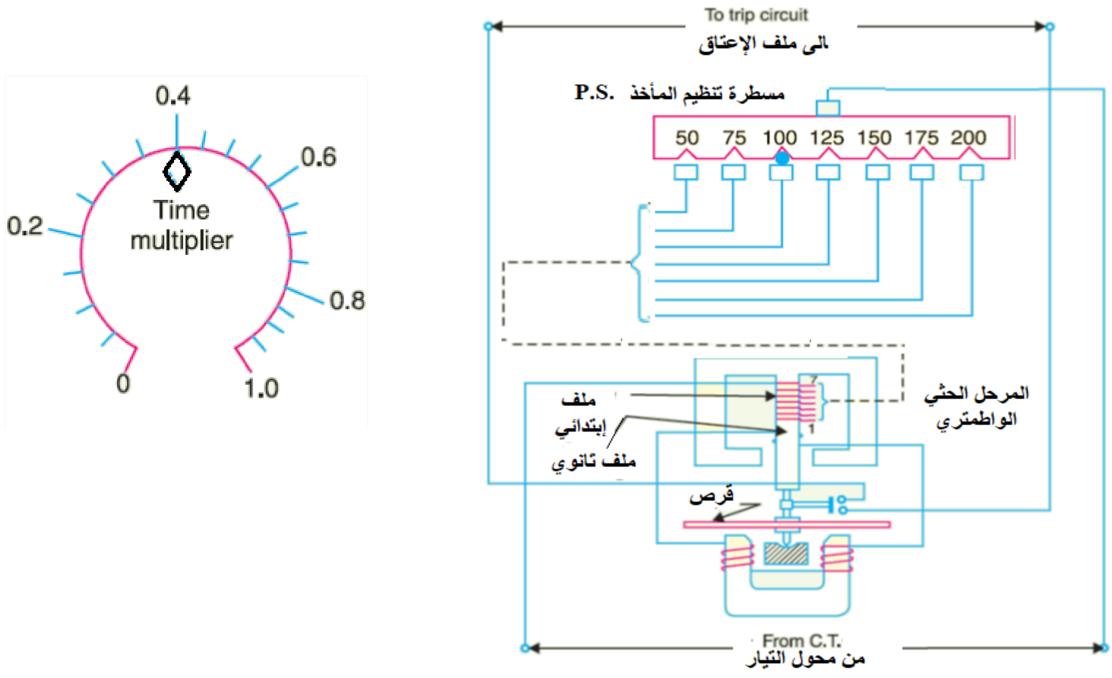
الشكل 10-22 خواص الزمن – التيار للمرحلات الأميركية الخاصة بالحماية من التيارات الفوقية.

7- المرحلات الحثية ذات ميزات التأخير الزمني العكسي الأدنى المحدد IDMTL Relays المصنعة وفق النظام الدولي IEC والبريطاني B.S.

في هذا النوع من المرحلات يتطلب اشتغال المرحل كمية معينة من الفيض والتيار – لفات. ويتم اختيار تنظيمات التيار للمرحل بواسطة تغيير عدد اللفات لملف الإثارة بوساطة وسيلة تنظيم تسمى مسطرة تنظيم المأخذ (P.S.(Plug Setting الموضحة في الشكل10–23 (أ).

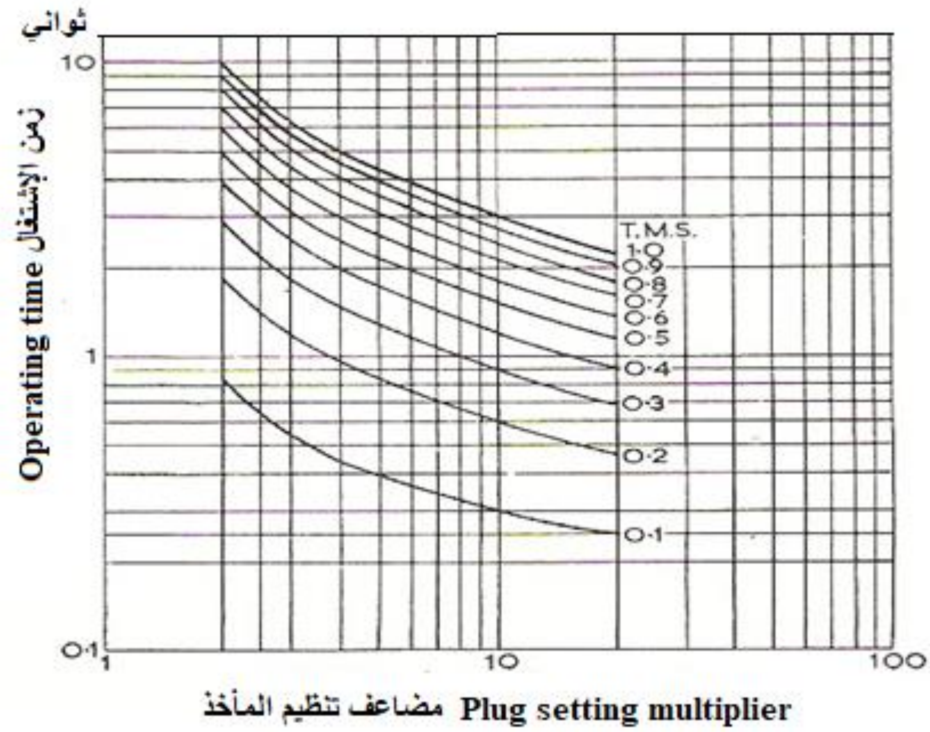
ومسطرة تنظيم المأخذ تزود بصورة عامة في المرحلات الخاصة بالحماية من التيارات المفرطة لكون أنه في بعض الأماكن التي يكون مستوى العطل فيها عالٍ جداً تكون قيم التيارات عالية جداً قد لا يتحملها المرحل نفسه. لذلك ولأجل تجنب استبدال المرحل تقوم الشركات المصنعة بتزويد المرحل بهذه الوسيلة لكي يتلاءم ومستوى العطل. فمثلا إذا نظم مرحل تيار فوقي (تياره المقنن 5A) عند100% = P.S. فانه سوف يعمل بتيار يساوي 5 أمبير. وإذا نظم عند P.S.=200% فانه سوف يعمل بتيار يساوي10 أمبير. أما إذا نظم عند P.S.=50% فإنه سوف يعمل بتيار يساوي 2.5 أمبير وهكذا. كما يبين الشكل 10–23 (ب) زر اختيار المنحني الزمني الذي يتدرج من 0.1 الى 1 ليعطي مجموعة من المنحنيات التي يعمل عليها المرحل. هذه المنحنيات مبينة في الشكل 10–24 التي تسمى بالنظام البريطاني: تنظيم مضاعف الزمن (Time multiplier setting (TMS وهو يناظر تنظيم مزولة الزمن TDS في النظام الأميركي.

ولغرض الاختصار في كمية المنحنيات لتلافي ارباك المهندسين العاملين في مجال الحماية فإن منحنى ضبط واحد فقط يعطى عند قيمة TMS=1 كما موضح في الشكل 10– 25 أو يرسم على وجه المرحل للحفض من الضياع بصيغة خط مستقيم كما في الشكل 10–26 ويطبق هذا على جميع التنظيمات الأخرى.

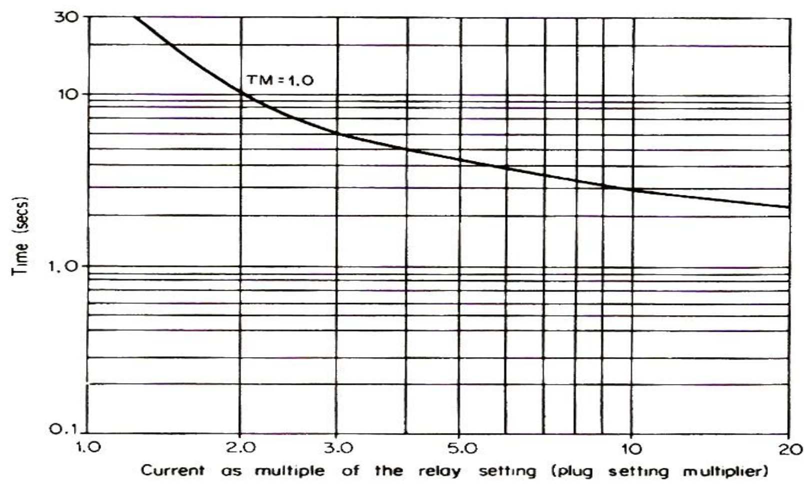


(ب) (أ)

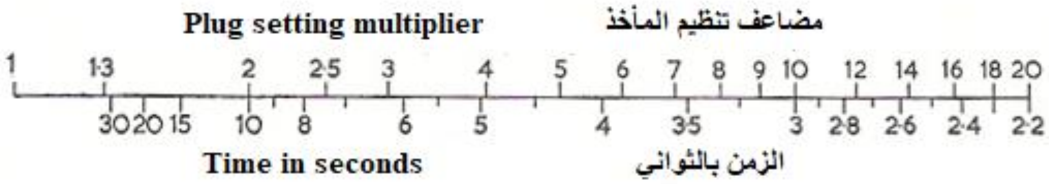
الشكل 10–23 المرحل الحثي الواطمتري ويبين الشكل تنظيم المأخذ Plug Setting (P.S.).



الشكل 10–24 مجموعة منحنيات لمرحل مصنع بموجب النظام الدولي أو البريطاني.



الشكل 10 – 25 مميزات وخواص المرحل نوع I.D.M.T.L عند TMS=1.



الشكل 10 – 26 مميزات وخواص المرحل نوع I.D.M.T.L عند TMS=1.

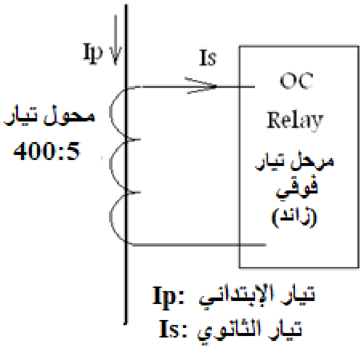
إن تنظيم المأخذ P.S. يمكن إعطاؤه مباشرة بوحدات التيار (الأمبير) أو بصورة غير مباشرة بوصفها نسبة مئوية من التيار المقنن. والتنظيمات النموذجية لمرحل عطل أرضي هي من 20 إلى 80% بتدرج 10% ولمرحل تيار فوقي مفرط (مرحل عطل طور إلى طور) هي من 50 إلى 200% بتدرج 25%.

8- مفهوم مضاعف تنظيم المأخذ PSM في النظام الدولي

يقصد بمضاعف تنظيم المأخذ(Plug Setting Multiplier) PSM هو التيار الحقيقي للمرحل مقدراً بقيمة ج. م. ت وممثلا بمضاعفات تيار تنظيم المأخذ P.S.. فمثلا إذا نظم مرحل تيار فوقي (تياره المقنن5 أمبير) عند 200% فإن تيار تشغيله سيكون 10 أمبير، وإذا كان التيار الحقيقي المار بالمرحل أثناء العطل 150 أمبير ، عليه يجب أن يكون مضاعف تنظيم المأخذ PSM مساوياً 15. والمثال التالي يوضح كيفية حساب المضاعف المذكور.

مثال محلول 10−2

إحسب مضاعف تنظيم المأخذ PMS لمرحل تيار فوقي يعمل بتيار 5 أمبير وبزمن كلي مقداره 2.2 ثانية (هذا هو التيار والزمن القياسي لمعظم أنواع المرحلات للتيارات الفوقية) ؛ إذا كان تنظيم المأخذ منظم عند PS=200%، وكان المرحل مربوط إلى محول تيار نسبة تحويله 400:5 أمبير وكان تيار العطل 12000 أمبير .



الحل:

تيار الابتدائي للمحول (وهو تيار العطل) $I_p = 12000A$.

تيار الثانوي وهو التيار المار بالمرحل:

$$I_s = 12000 \times \frac{5}{400} = 150A$$

لتنظيم مأخذ PS = %200 :يكون التيار المشغل للمرحل

$$I_{relay} = 5 \times \frac{200}{100} = 10A$$

عليه يكون مضاعف تنظيم المأخذ

$$PSM = \frac{\text{التيار المار بالمرحل}}{\text{التيار المشغل للمرحل}} = \frac{I_s}{I_{relay}} = \frac{150}{10} = 15$$

في المرحلات الحثية المبينة في الشكل 10− 17 والتي لازالت في الخدمة إلى الوقت الحاضر فأن تيار معلوم يولد عزم تدوير من شأنه أن يجعل القرص يصل إلى سرعة ما بحيث أن المغناطيسي الدائم الكابح يولد عزما كابحاً يكون أقل بقليل من عزم التدوير. والفرق بين هذين العزمين هو العزم اللازم للتغلب على الاحتكاك ونابض إعادة الضبط للمرحل. إن الفرق بين أقل تيار لازم لجعل القرص يبدأ بالدوران وبين تيار اللقط Pickup current للمرحل يجب أن يكون قليلاً (حوالي 5% من التنظيم) والمرحل الجيد هو الذي يمتلك عزم تدوير كبيراً وعزماً كابحاً كبيراً. ويجب أن يكون الاحتكاك أقل ما يمكن. كذلك القرص يجب أن يكون خفيفاً لكي تكون فترة التعجيل الابتدائي صغيرة بحيث يمكن اهمالها؛ وهذا القرص يجب أن يدور بسرعة ثابتة (عند مرور تيار معين). عليه فإن الزمن اللازم لتشغيل المرحل يتناسب طردياً مع زاوية الانتقال أي انتقال ملامسات المرحل نحو بعضها. أن عزم التدوير الكبير يعطي

ضغطا جيداً على ملامسات الإعتاق. وعندما تغلق هذه الملامسات تحت هذا الضغط فإن إحتمال حدوث شرارة كهربائية بينها يكون أقل ما يمكن عند إزالة العطل بواسطة قاطع الدائرة ويقوم نابض إعادة الضبط بإرجاع القرص إلى موضعه الأصلي لكيلا يبقى بوضع وقوف خلفي. أن عزم الكبح العالي يعطي زمن صغير لتجاوز الحد over- shoot time (هذا الزمن هو الزمن الذي يستمر فيه القرص بالدوران بعد رفع عزم التدوير عنه) لكن قد يعطي زمن إعادة ضبط أطول الذي من خلاله سيكون توقيت المرحل غير صحيح إذا ما حصل عطل آخر.

أن منظم الزمن للمرحل المؤشر من 0 إلى 1 المبين في الشكل 10−23 (ب) الذي يدعى بمضاعف الزمن (T.M) يضبط موضع التوقف الخلفي المتحرك. فعندما يكون مضاعف الزمن موضوعاً على الرقم 1 فإن موضع التوقف− الخلفي يكون أبعد ما يمكن إلى الخلف بينما إذا كان مضاعف الزمن موضوعا على الصفر فإن التوقف الخلفي يكون بوضع بحيث تكون ملامسات المرحل مقفولة على بعضها تقريبا. أن مضاعف الزمن يكون بالتقريب متناسبا جدا مع زاوية انتقال ملامسات المرحلات. لكنه يضبط بحيث يعطي سماحاً للتعجيل الابتدائي ونابض إعادة الضبط. إن أقل قيمة عملية لتنظيمه هي حوالي 0.1، وأقل من هذه قيمة لهذا التنظيم سوف يجعل ملامسات المرحل تغلق صدفة بسبب الإهتزازات أو لأية أسباب أخرى.

وللمرحلات نوع IDMTL تعطي المواصفات القياسية البريطانية الرقم B.S. 142 ؛ العلاقة بين مضاعف تنظيم المأخذ PSM وزمن تشغيل المرحل لمضاعف زمن مقداره TMS=1 هذه المعلومات مبينة في الشكل 10−25 يلاحظ هنا أن العلاقة عكسية إلا أن الزمن يبدأ بالثبوت بين PSM = 10 و PSM =20 (وهذا يعرف بالزمن الأدنى المحدد).

عندما تكون قيمة PSM = 1 فهذا معناه أن تيار المرحل يساوي تيار تنظيمه. من الواضح أن المرحل سوف لا يعمل بتيار أقل من قيمة تيار تنظيمه. لكن المصنعين بصورة عامة يجعلون نسبة سماح مقدارها 30% على تيار اللقط بحيث أن المرحل يجب أن يعمل (يلتقط) بين PSM =1 و PSM =1.3 ويستغرق

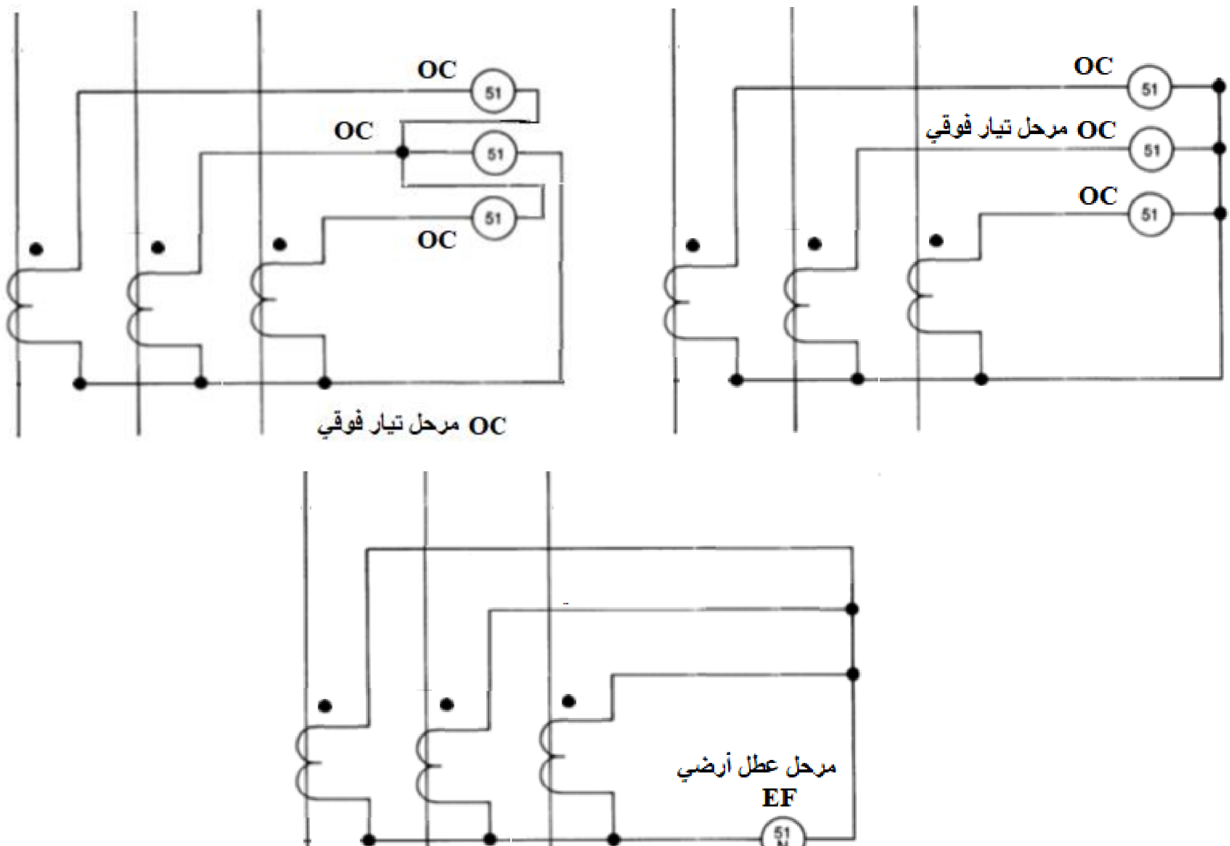
زمناً يقرب من 30 ثانية لكي يشتغل ولتجنب الاشتغال في هذه المنطقة القلقة من المعتاد أن يتم ضبط قيمة PSM بحيث يكون أكبر من 2 (PSM> 2) لأقل تيار عطل ممكن. في حالة مرحلات التيار الفوقي من الضروري التأكد من أنه لتيارات الحمل القصوى يجب أن يكون يكون PSM أصغر من 1 ضمن مدى أو نطاق أمين ومعقول، ذلك لأن وسيلة الحماية ليس من شأنها أن تتعامل مع منظومة عليها حمل زائد مفرط لفترة قصيرة جداً.

إن الجزء من المنحنى الذي يعطي خواص الزمن الأدنى المحدد DMTL لمرحل نوع الملف– المزدوج يمكن أن يؤمن عمليا وذلك بربط ملف مفاعل قابل للتشبع (ذو قلب حديدي مغلق) عبر المغناطيس السفلي، المغناطيس على شكل حرف U. وللمرحلات ذات الأقطاب المظللة يتم ذلك بتقليل مقاطع الحديد بالتدريج ابتداء من الأقطاب وانتهاء بملف التشغيل حتى يكون الفيض المتسرب من الملف أكبر ما يمكن عند التيارات الكبيرة. هذا الأسلوب يجعل المرحل يشتغل بزمن قليل جداً (أدنى) في الحالات التي تكون فيها تيارات العطل عالية جداً.

إن المرحل نوع IDMTL الذي له خواص زمنية مبينة في الشكلين 10– 22 و 10–24 هو النوع الذي يستخدم اعتيادياً في حماية خطوط النقل بصورة عامة حيث أن خواصه الزمنية لا يمكن التعبير عنها بمعادلة رياضية سهلة، لكن يمكن تصميم المرحلات بحيث تمتلك خواص زمنية إما بصيغة: التيار × الزمن= ثابت، أو $(\text{التيار})^2$ × الزمن = ثابت؛ وتستخدم هذه المرحلات الأخيرة عندما يراد بها الحماية ضد الحرارة المفرطة (بدلا من استخدامها للحماية ضد التيار المفرط). إن الخواص الزمنية العامة يمكن كتابتها بصيغة $I^n t$ = ثابت، وفي المرحلات الستاتيكية (الإلكترونية) قد يصل العدد n إلى حوالي 8. مثل هذه المرحلات لها تطبيقات متخصصة جداً.

بصورة عامة تتم حماية خطوط نقل القدرة الثلاثية الطور بثلاث محولات تيار مربوطة بشكل نجمي. وكذلك ثلاث مرحلات نوع I D M T L تكون دوائر الإعتاق فيها مربوطة على التوازي. ويمكن ترتيبها كثلاث

مرحلات للتيار الفوقي كما في الشكل 10- 27(أ) أو مرحلي تيار فوقي ومرحلاً ضد عطل أرضي كما في (ب) من الشكل نفسه. وفي الشكل 10-27 (أ) يجب تنظيم جميع المرحلات التيار الفوقي عند قيم تيار الحمل الأعظم. عليه يجب أن يكون تيار العطل الأدنى أكبر من تيار الحمل الأعظم هذا. ولأعطال أرضية والأعطال من نوع طور إلى طور يكون العبء على كل محول تيار هو المرحل الخاص به يضاف إليه أسلاك التوصيل في الثانوي.



(جـ)

الشكل 10-27 : (أ) ثلاث مرحلات للتيار الفوقي ، (ب) مرحلان للتيار الفوقي وواحد لعطل الأرض، (جـ) مرحل واحد فقط لعطل الأرض.

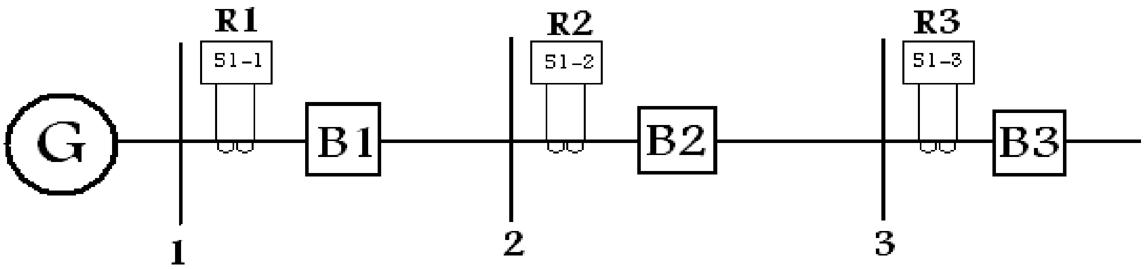
أما في الشكل 10-27(ب) فيكون المرحل الوحيد خاصاً بعطل أرض وذلك لأنه يستطيع تحسس تيار التتابع الصفري فقط . أما خلال الظروف الاعتيادية والمتوازنة فإن هذا المرحل لا يحمل أي تيار،

ولذلك فإن تنظيمه قد يأخذ أية قيمة كانت أكبر من الصفر. وعمليا فإن هذا التنظيم يكون بحدود 10%. هذه الدائرة تستخدم عندما يكون تيار العطل الأرض أقل من تيار الحمل الأعظم. وخلال العطل الأرض يكون العبء على محول التيار الفعال متألفاً من مرحل تيار مفرط ومرحل العطل الأرض مربوطين على التوالي. وإذا كان تنظيم مرحل العطل الأرض قليلا فإن مقاومة ممانعته قد تكون من الكبر بحيث أن العبء الكلي على محول التيار يتسبب في تشبعه. لذلك يكون من الضروري استعمال ربط مرحلي تيار مفرط ومرحل واحد لعطل الأرض فإن محول التيار يجب أن يمتلك فولتيات نقطة الانحناء (الركبة) عالية بحيث تكون كافية لضمان عمل المرحلات تحت عموم ظروف العطل. وإذا ربطت محولات التيار الثلاثة على التوازي (ويشار إليه هنا بالربط الاستبقائي) عبر مرحل واحد (انظر الشكل 10−27 (جـ)) فإن هذا المرحل سوف يتحسس تيارات عطل أرض فقط.

10-15-2 حماية خطوط النقل الشعاعية بمرحلات التيار الفوقي

Protection of Radial Lines by Overcurrent Relays

يقصد بالخط الشعاعي هو خط النقل الذي تتم تغذيته من جهة واحدة فقط؛ وغالبا ما يستخدم في المناطق المحدودة والمناطق الريفية البعيدة. وهو أبسط أنواع خطوط النقل وأسهلها بناءً وحمايةً. ويبين الشكل 10−28 استخدام مرحلات تيار فوقي لحماية خط شعاعي يغذي ثلاث محطات تحويل ثانوية 1 و2 و3 وهو مغذى من جهة واحدة فقط.



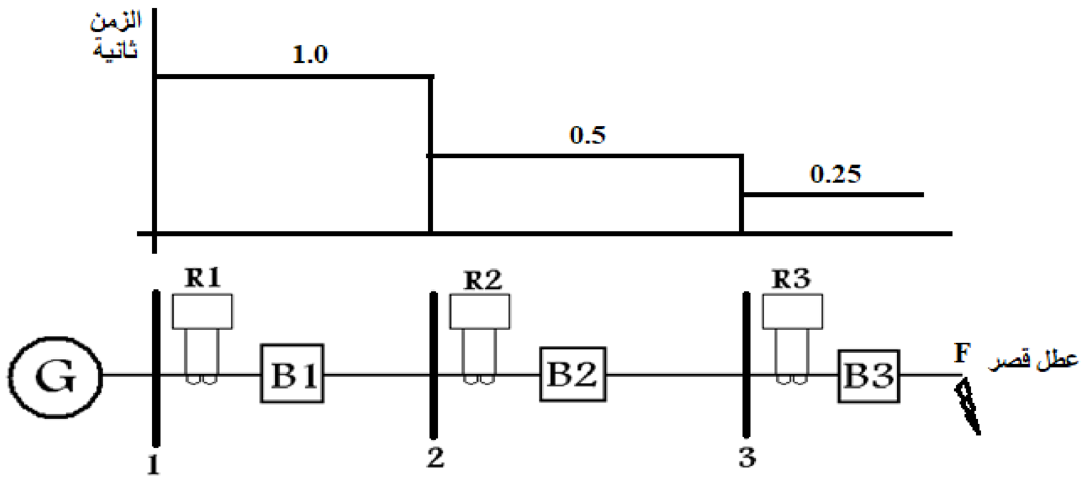
الشكل10−28 استخدام مرحلات تيار فوقي لحماية خط شعاعي يغذي ثلاث محطات تحويل ثانوية.

لغرض ضمان استمرارية تجهيز القدرة الكهربائية فإن عطلاً قريب من المحطة الثانوية 3 يجب أن يزال بأسرع وقت من قبل القاطع B3 من خلال المرحل R3 بحيث يبقى القاطع B2 والقاطع B1 مغلقان

ويجهزان المحطتين 2 و 1 بالقدرة الكهربائية. هذه العملية الخاصة بتنظيم أزمان الحماية تسمى التنسيق أو التمييز الحمائي ويتم تحقيقها بأحد الطرق التالية:

(1) التنسيق بالزمن Time grading:

في هذه الطريقة تستغل حقيقة أن تيارات الأعطال تكون أعلى كلما كان العطل قريب من المصدر. لذلك يتم ضبط المرحلات حتى تعمل عند تيارات متدرجة مناسبة والتي تقل كلما زادت المسافة من المصدر. ويوضح الشكل 10-29 مثالا لطريقة التنسيق بالتيار مطبقة على نظام خط نقل شعاعي.



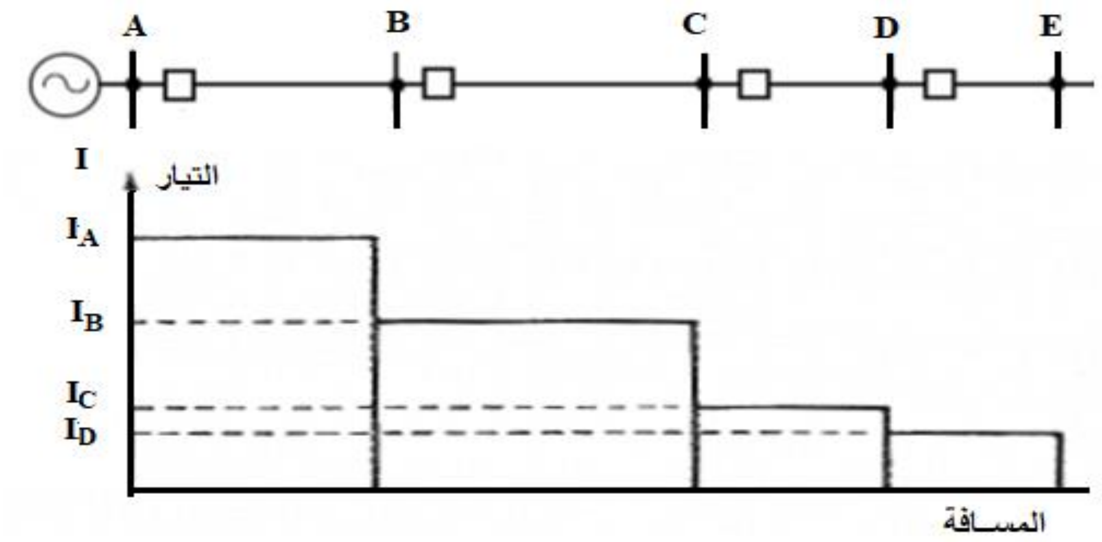
الشكل 10- 29 التنسيق الحمائي بواسطة الزمن فقط.

لاحظ أنه في كل من النقاط 1و2و3 توجد وحدة حماية مزودة بمرحل تيار فوقي ذي زمن تأخير محدد من نوع Definite time-delay overcurrent relay. ويساهم التأخير الزمني في عملية الانتقائية selectivity. ويتم ضبط المرحل عند القاطع رقم 3 على أقل تأخير زمني (0.25 ثانية). ويلي ذلك المرحل عند القاطع 2 على تأخير زمني 0.5 ثانية والمرحل عند القاطع 1 على ثانية واحدة. ففي حالة حدوث عطل كهربائي عند النقطة F سيعمل المرحل عند القاطع 3 أولاً ويقوم بعزل منطقة العطل قبل أن تعمل المرحلات2 و 3. من محاسن هذه الطريقة هي أنها سهلة جدا، لكن من عيوبها أن أطول فترة تأخير زمني يكون قريب من مصدر التغذية الرئيسي حيث يكون تيار العطل بأعلى قيمة وهو ما يستوجب قطعه بأسرع وقت في متطلبات الحماية.

(2) التنسيق بواسطة التيار Current grading :

في هذه الطريقة يتم الاستفادة من حقيقة أن تيار القصر يكون أكبر ما يمكن بجوار المصدر وبالتالي يتم ضبط المرحلات على قيم للتيار تتناقص كلما بعدت المسافة عن المصدر. ويوضح الشكل 10-30 مثالا لتنسيق قيم التيار على طول خط نقل شعاعي. هذه الطريقة من التنسيق اقتصرت على خطوط التوزيع

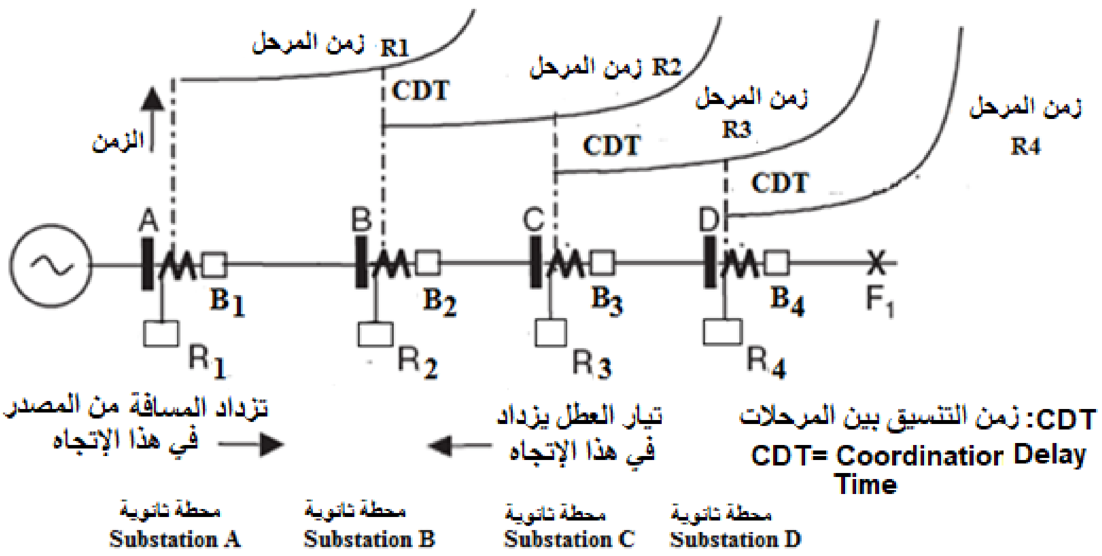
للفولتية المنخفضة ولا تستعمل في الوقت الحاضر لخطوط نقل الفولتية العالية، لذلك سوف لا يتم التطرق اليها بالتفصيل في هذا الكتاب.



الشكل 10-30 التنسيق بقيم التيار على طول خط نقل شعاعي.

(3) التنسيق بالزمن - التيار كليهما Time-Current grading

الطريقتان السالفتان المستخدمتان للتنسيق باستخدام الزمن لوحده أو التيار لوحده لهما مساوئهما. لذلك تم التوجه لتطوير حماية الخطوط باستخدام خواص المرحل الزمني العكسي لزيادة التيار للتغلب على القصور الحادث بسبب استخدام أياً من التنسيق بالتيار أو الزمن لوحدهما. أنظر الشكل 10-31.



الشكل 10–31 التنسيق بالزمن والتيار كليهما.

إن استخدام الحماية باستغلال خصائص الزمن – التيار العكسية تؤمن تناسب زمن تشغيل المرحل عكسياً مع مستوي تيار العطل، هذه الخصائص تؤمنها مرحلات الزمن العكسي الأميركية الصنع مثل المرحلCO-7 الذي هو الأكثر شيوعاً في الاستخدام، وكذلك المرحل نوع IDMTL المصنع وفق النظام الدولي والبريطاني. وسيتم في الفقرات التالية شرح أسلوب ضبط مرحلات حماية خطوط النقل باستخدام النظامين الأميركي والدولي كليها وذلك لتواجد هذان النظامان في الدول العربية ودول العالم الثالث كون أن هذه الدول تقوم الشركات العالمية من أميركا وأوربا ببناء خطوط النقل فيها وليس لها نظام معين خاص بها.

الشكل 10–31 يبين استخدام مرحلات متدرجة الزمن لحماية خط مغذ شعاعي يقوم بتغذية أربع محطات ثانوية على التعاقب وهي A و B وC و D ؛ حيث يلاحظ هنا أن فرق تدرج الزمن بين المرحلات المتجاورة هو الزمن CDT مقدراً بالثواني كزمن بوصفه قيمة نموذجية؛ وهو ما يطلق عليه زمن التأخير للتنسيق بين المرحلات. تكون قيمته في النظام الأميركي 0.4 ثانية وفي النظام الدولي أو البريطاني 0.5 ثانية. فمثلاً: عند حدوث عطل في نقطة F، يغلق المرحل في D ملامسات الإعتاق بعد مرور 0.1 ثانية من نشوء العطل ويعطى زمن احتياطي قدره 0.5 ثانية لقاطع الدائرة فيD باعتباره وقتاً كافياً لإزالة العطل من المنظومة قبل اشتغال القاطع في C. وإذا حدث وإن اشتغل المرحل C قبل B فهذا يعد فشل تشغيلي في منظومة الحماية.

إن نصف الثانية الاحتياطي للزمن هذا في النظام الدولي قد يقسم إلى ما يلي:

- الزمن الكلي لعمل قاطع الدائرة 0.12 ثانية
- مقدار الخطأ في اشتغال المرحل لكل من قاطعي الدائرة المتجاورين (C سريع؛ D بطئ)

هو 0.2 ثانية مع نطاق أمان 0.1 ثانية، فيصبح الزمن الكلي 0.5 ثانية. هذا لتردد منظومة نقل مقداره 50 هرتز.

وفي النظام الأميركي يكون تنسيق الفترة الزمنية بين مرحلين متجاورين هو 0.4 ثانية حيث جاء هذا الزمن من الآتي:

- زمن قطع التيار للقاطع (يساوي 0.1 ثانية، أو 6 دورات في منظومة ترددها 60 هرتز)
- هامش خطأ مقداره 0.3 ثانية.

على هذا الأساس يكون CDT = زمن اشتغال القاطع + هامش الخطأ = 0.1+0.3= 0.4 ثانية.

3-15-10 حماية خطوط النقل الشعاعية بمرحلات التيار الفوقي المصنعة وفق النظام الأميركي

إشارة الى الشكل 10-31 يكون التنسيق بين المرحلات لعطل في النقطة F1 كالآتي:

المرحل R4 الذي يفصل القاطع B4 يشتغل بسرعة في زمن مقداره T1 يتبعه اشتغال المرحلات التي تتحكم في B3 و B2 وكذلك B1 بحيث أن القاطع B4 يفصل قبل القاطع B3 والقاطع B3 قبل B2 والقاطع B2 قبل B1. لذلك فزمن اشتغال المرحل R3 وهو (T2) يمكن التعبير عنه بالمعادلة البسيطة: $T2 = T1 + CDT$

وتكون أزمان اشتغال المرحلين R2 و R1 هي:

$$T3 = T2 + CDT$$
$$T4 = T3 + CDT$$

اختيار تنظيم مأخذ التيار CTS وتنظيم زمن التأخير TDS

في المرحلات الأميركية يتم اختيار تنظيم مأخذ التيار وفق الإستراتيجية التالية:

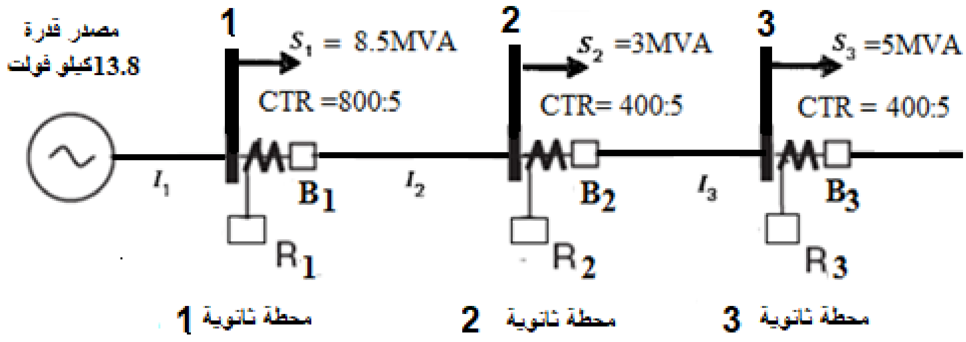
CTS ≤ ⅓ × أقل تيار عطل
CTS ≥ 2× أعظم تيار للحمل
CTS ≤ ⅓ x Minimum fault current CTS ≥ 2 x Maximum load current

ويتم اختيار TDS بحيث يكون تنسيق الزمن بين مرحل ومرحل آخر مجاور له 0.4 ثانية.

مثال محلول 10-2

لخط النقل الشعاعي المغذى بفولتية 13.8 كيلو فولت والموضح في الشكل 10-32، بافتراض أن كل الأحمال لها نفس معامل القدرة وقدره 0.9، حدد قيم مناسبة لضبط المرحلات 2 و 3 اللازمة لحماية النظام بافتراض استخدام مرحل تيار فوقي من نوع CO-7 (خصائص هذا النوع موضحة في الشكل 10- 22 (أ). علما أن تيارات عطل قصر دائرة ثلاثي الطور متماثل تمت حساباته كالآتي:

عند قضيب التوزيع 3 :2092 أمبير، قضيب التوزيع 2: 2789 أمبير وقضيب التوزيع 3: 4184 أمبير.



الشكل 10- 32 .

الحل:

(أ) تنظيم المرحل رقم 3

1- نحسب تيار الحمل في قضيب التوزيع 3 :

$$I_3 = \frac{S_3}{\sqrt{3} \times V} = \frac{5 \times 10^9}{\sqrt{3} \times 13.8 \times 10^3} = 209\ A$$

التيار الذي يمر في المرحل 3 :

$$I_{R3} = 209 \times \frac{5}{400} = 2.61A$$

تيار العطل عند قضيب التوزيع 3 (معطى): $I_{3f} = 2092\ A$

تيار العطل المار في المرحل 3:

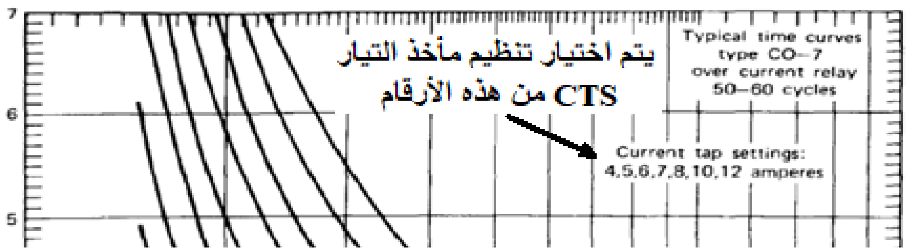
$$I_{R3f} = 2092\ A \times \frac{5}{400} = 26.1A$$

- اختيار CTS :

$$2 \times 2.61 \leq CTS_3 \leq \frac{1}{3} \times 26.1$$

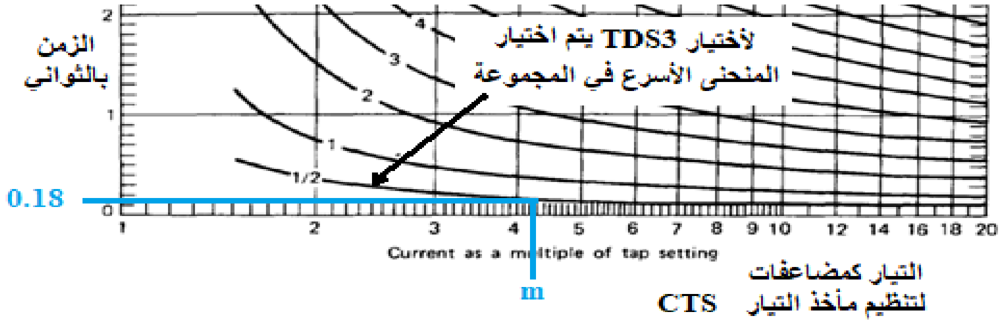
$$5.22 \leq CTS_3 \leq 8.7$$

من خصائص المرحل Co-7 المعطاة في الشكل 10-22(أ) ، أختر $CTS_3 = 6\ A$



2- اختيار منحنى ضبط التأخير الزمني TDS للمرحل رقم 3:

بالنسبة للمرحل رقم 3 يجب أن يكون اختيار زمن اشتغاله بحيث يكون الأسرع من بين المرحلات الثلاثة،
لذلك يتم اختيار المنحني الأوطأ في المجموعة وهو المرقم: $TDS_3 = \frac{1}{2}$



3- الآن نجد زمن اشتغال المرحل رقم 3 t_{op} وذلك بإيجاد قيمة التيار كمضاعفات لتيار المأخذ وليكن m:

$$m = \frac{I_{3\,relay\,(fault)}}{CTS_3} = \frac{26.1}{6} = 4.35$$

نثبت هذه القيمة m على المحور السيني (الأفقي) ومنها نقيم عمود على المحني $TDS_3 = \frac{1}{2}$ فنجد أن زمن اشتغال المرحل رقم 3 كما موضح في المرتسم أعلاه هو $t_{op} = 0.18\ s$.

(ب) تنظيم المرحل رقم 2

1- تيار الحمل في قضيب التوزيع 2:

$$I_2 = \frac{S_2 + S_3}{\sqrt{3} \times V} = \frac{(5+3) \times 10^9}{\sqrt{3} \times 13.8 \times 10^3} = 335\ A$$

نجد التيار الذي يمر في المرحل 2 :

$$I_2 = 335 \times \frac{5}{400} = 4.18\ A$$

تيار العطل عند قضيب التوزيع 3 (معطى) :

$$I_{2f} = 2789\ A$$

تيار العطل المار في المرحل 3:

$$I_{R2f} = 2789\ A \times \frac{5}{400} = 34.86A$$

2- اختيار CTS_2 للمرحل 2 :

$$2 \times 4.18 \leq CTS_2 \leq \frac{1}{3} \times 34.9$$

$$8.36 \leq CTS_2 \leq 11.6 \quad \rightarrow \quad \therefore\ CTS_2 = 10\ A$$

-2 اختيار منحنى ضبط التأخير الزمني TDS للمرحل رقم 2:

بالنسبة للمرحل رقم 2 يجب أن يكون اختيار زمن اشتغاله بحيث أنه:

- يعمل كحماية ساندة للمحطة الثانوية 3
- يقوم بحماية المحطة الثانوية 2 نفسها في حالة حدوث عطل فيها

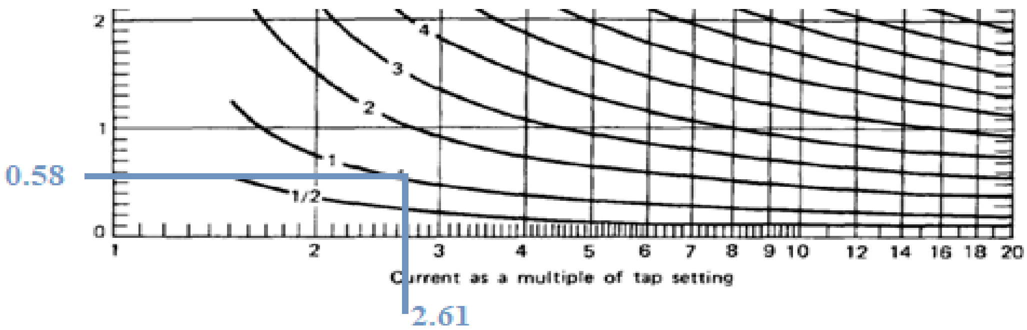
لما كان المرحل رقم 3 يعمل بزمن 0.18 ثانية فلأجل أن يعمل المرحل 2 كحماية ساندة له يجب أن نضيف مقدار التأخير الزمني التنسيقي CDT بين المرحلات المتجاورة وهو 0.4 ثانية في النظام الأميركي.

$$\therefore\ t_{2op} = 0.18 + 0.4 = 0.58\ s$$

الآن نجد قيمة التيار كمضاعفات لتيار المأخذ وليكن m_2 لعطل في المحطة 3 :

$$m_2 = \frac{I_{2\ \text{مرحل}\ (3\text{عطل})}}{CTS_2} = \frac{2092 \times (\frac{5}{400})}{10} = 2.61$$

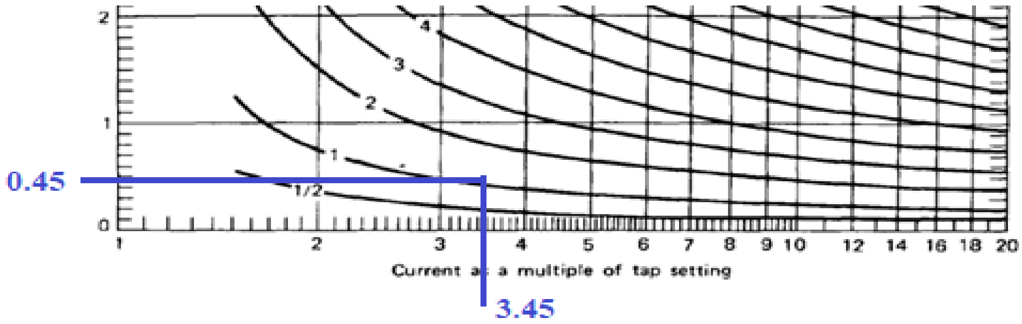
نذهب الآن الى منحنيات خواص المرحل CO-7 ونجد النقطة (2.61,0.58) لكي نحدد قيمة $TDS_2 = 1.1$ تقريباً.



وذلك نكون قد حددنا قيمة TDS_2 للمرحل رقم 2 .

أما الخطوة التالية فهي إيجاد الزمن الحقيقي لاشتغال المرحل 2 عندما يكون العطل بالقرب منه :

$$m_2' = \frac{I_{2\ \text{مرحل}\ (2\text{عطل})}}{CTS_2} = \frac{2789 \times (\frac{5}{400})}{10} = 3.49$$



من خواص المرحل CO-7 لقيمة $TDS_2 = 1.1$ و $m_2' = 3.49$ نجد أن زمن اشتغال المرحل 2 لعطل بالقرب منه هو 0.45 ثانية.

ولإيجاد قيم الضبط للمرحل 1 يتم التنسيق بينه وبين المرحل 2 بالاسلوب نفسه الذي اتبعناه في المثال أعلاه ويترك للقارئ حله كتمرين مع التنبيه بان التنسيق يجري دائماً بين كل مرحلين متجاورين.

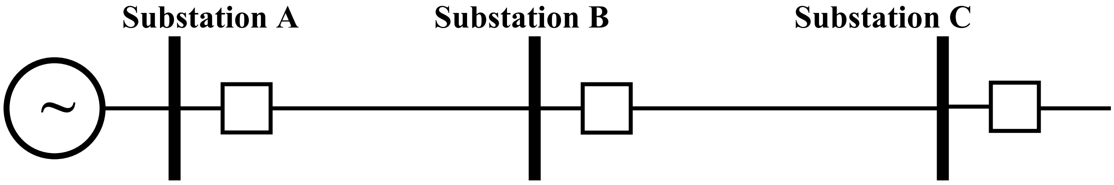
4-15-10 حماية خطوط النقل الشعاعية بمرحلات التيار الفوقي المصنعة وفق النظام الدولي أو البريطاني:

التنسيق الحمائي بين المرحلات في النظام الدولي والبريطاني مشابه لحد ما التنسيق الحمائي في النظام الأميركي مع اختلاف التسميات. ويبين الجدول 10−3 الأسماء المناظرة في كلا النظامين.

النظام الأميركي American Standard	النظام الدولي والبريطاني IEC & BS standard
تنظيم مأخذ التيار Current Tap Setting (CTS)	تنظيم المأخذ Plug Setting (PS)
تنظيم مزولة الزمن Time Dial Setting (TDS)	تنظيم مضاعف الزمن Time Multiplier Setting (TMS)
مضاعفات تنظيم مأخذ التيار Multiple of CTS	مضاعفات تنظيم المأخذ Plug Setting Multipler (PSM)

مثال محلول 3-10

لخط النقل الموضح في الشكل 10−34 ، المطلوب إيجاد تنسيق حمائي بين المرحلين الموجودين في المحطة الثانوية C و B .

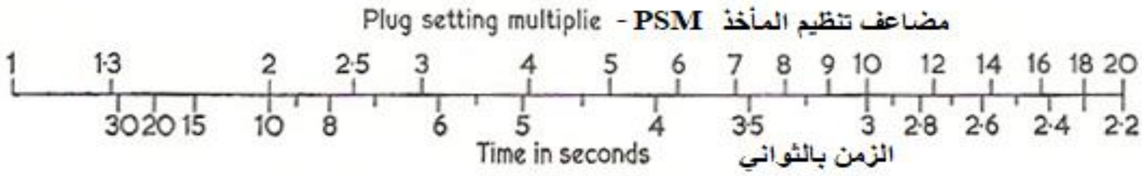


الشكل10−34.

قيم التيارات وتنظيم المرحلات معطاة في الجدول التالي :

Relay point نقطة المرحل	Plug setting(PS) تنظيم المأخذ	CT ratio نسبة محول التيار	Fault current تيار العطل
A	125%	400/5	6000A
B	125%	200/5	5000A
C	100%	200/5	4000A

استخدم مرحل التيار الفوقي نوع IDMTL ذي زمن 2.2 ثانية والمعطاة خواصه في الشكل 10-35 لمضاعف تنظيم الزمن TMS = 1.



الشكل 10-35.

الحل: عند نقطة المرحل C يكون تيار العطل المار في المرحل

$$I_{RC} = 4000 \times \frac{5}{200} = 100\ A$$

لتنظيم مأخذ : PS=100%

$$PSM = \frac{100}{5 \times 1} = 20$$

لمنحني TMS = 1 ، زمن الاشتغال المرحل المناظر مضاعفات تنظيم المأخذ PSM = 20 هو 2.2 ثانية. فإذا اخترنا المرحل R_c ليشتغل بأسرع وقت، لذا فلمضاعف تنظيم الزمن TMS=0.1 يكون زمن اشتغال المرحل R_c :

$$t_{op\,R_C} = \frac{0.1 \times 2.2}{1.0} = 0.22\ sec$$

عليه يكون تنظيم المرحل R_c

$$\text{TMS} = 0.1$$
$$t_{op\,R_C} = 0.22\ sec$$

تنظيم المرحل في النقطة B

المرحل R_B يجب أن يعمل كحماية ساندة لعطل عند النقطة C ويستجيب لعطل قرب النقطة B.
لغرض التنسيق الحمائي بين المرحلين المتجاورين R_c و R_B نجعل هامش زمن تأخير مقداره 0.5 ثانية بين اشتغالهما وهو زمن التأخير التنسيقي في النظام الدولي البريطاني ، لذا فلعطل عند النقطة C:

$$I_{R_B} = \frac{4000}{\frac{200}{5}} = 100\ Amps$$

$$t_{op\,R_B} = 0.22 + 0.5 = 0.72\ sec$$

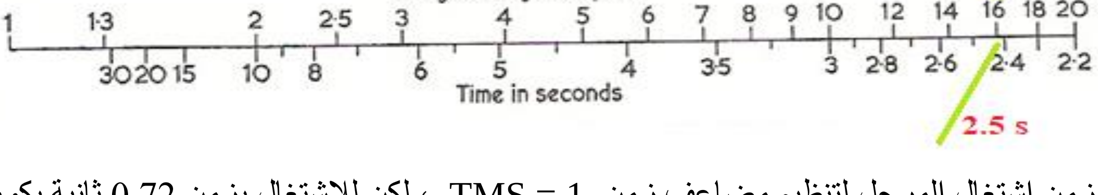
تنظيم المأخذ للمرحل B : PS = 125%

لذا يكون زمن اشتغال المرحل B (بدلاً من 5 أمبير)

$$= 5 \times 1.25 = 6.25\ A$$

$$PSM = \frac{100}{6.25} = 16$$

من خواص المرحل نجد ان زمن اشتغال المرحل لـ $PSM = 16$ هو 2.5 ثانية .



هذ زمن اشتغال المرحل لتنظيم مضاعف زمن TMS = 1 ، لكن للاشتغال بزمن 0.72 ثانية يكون :

TMS	t_{op}
1	2.5
x	0.72

ولعطل قرب B : 25A

$$I_{R_B} = 5000 \times \frac{5}{200} = 1$$

$$\text{PSM} = \frac{125}{6.25} = 20$$

وزمن الاشتغال للمرحل المناظر لـ PSM = 20 هو 2.2 ثانية.

أما الزمن الفعلي لاشتغال المرحل فيكون

$$t_{op\,R_A} = 2.2 \times (TMS = 0.29/TMS = 1.0) = 0.638\ \text{s}$$

الفصل الحادي العاشر

حماية خطوط النقل -الطرق البديلة

1-11مقدمة

أن موضوع الحماية بصورة عامة وحماية خطوط النقل بصورة خاصة تم التطرق إليه في الفصلين التاسع والعاشر من هذا الكتاب حيث ابتدئنا بشرح بعض المفاهيم الأساسية في الحماية وانتهينا بمناقشة حماية الخطوط باستعمال مرحلات التيار الفوقي وأنواعها. في هذا الفصل سوف نستكمل شرح وعرض طرق أخرى شائعة ومهمة لحماية خطوط النقل بأطوالها المختلفة غير طرق الحماية بمرحلات التيار الفوقي. ولأجل الشروع بعرض هذه الطرق يجب أن نتعرف في البداية على موضوع مهم في الحماية وهو حماية الوحدة الذي يشكل الموضوع الأساس في العديد من طرق حماية الخطوط والمولدات والمحولات وغيرها من الأجهزة والمعدات في المنظومة الكهربائية.

11−2 منظومات حماية الوحدة Unit Protective Systems

إن أنظمة حماية خطوط النقل التي تميز العطل وفقاً لتدرج الزمن والتي تمت مناقشتها في الفصل العاشر، تكون بالمقارنة مع الطرق المتقدمة الأخرى بسيطة ورخيصة الثمن ولا تحتاج إلى دوائر للأسلاك المرشدة (الدليلية) Pilot wires الطويلة. لكن زمن إزالة العطل لهذه المنظومات يكون بطيئاً عندما تستخدم مع فولتيات33kV فأعلى وكذلك للأجهزة والمعدات الغالية الثمن مثل المولدات والمحولات الكبيرة. ولإجل التغلب على هذه المعضلة يستخدم نظام حماية الوحدة. وتعرف منظومة حماية الوحدة بأنها تلك المنظومة التي تحتوي على مجموعتين من محولات التيار. هذه المحولات تكون متباعدة بمسافة معينة عن بعضها والتي تحدد نهاية القطاع المطلوب حمايته (أو المنطقة). عليه تكون محولات التيار مرتبطة مع بعضها بواسطة أسلاك مرشدة للدوائر المتضمنة مرحلات الحماية، وتكون منظومة الحماية في هذه الحالة تلقائية التمييز بدون استخدام تدرج الزمن. إن منظومات حماية الوحدة تكون لحظية (تعمل بحدود 0.1 ثانية) ولا تعتمد تنظيمات الزمن فيها على تنظيمات الزمن لمنظومات الحماية الاخرى. لذلك فهي تعطي المميزات والمحاسن التالية:

- ذات حساسية عالية
- يمكن استخدامها لخطوط النقل القصيرة

- غير حساسة لتأرجح مقادير القدرة المنقولة ضمن الخطوط
- تعمل مع مصادر القدرة الضعيفة (المولدات و المحولات)

المبدأ الأساس لحماية الوحدة (يطلق عليه عادة حماية Merz-Price) هو إن التيارات الداخلة والخارجة من قطاع معين تكون متساوية ومتماثلة إذا كان هذا القطاع سليماً (غير معرض لعطل). وتربط المرحلات لغرض قياس الفرق بين هاتين المجموعتين من التيارات (لذا يطلق على هذه المنظومات تسميات أخرى مثل منظومات الحماية الفرقية (التفاضلية) أو المتوازنة)، وذلك لأن التيار المار بالمرحل يساوي صفراً عندما يكون القطاع أو المنطقة في حالة اشتغال جيدة. إن حماية الوحدة لا تتحسس تيار الحمل وتيارات العطل الخارجية (خارج منطقة الحماية) وإذا ما حدث عطل داخل هذا الجزء (أو القطاع المحمي) فإن تيار المرحل سوف لا يكون صفراً وعليه فإن حساسية منظومة الحماية تجعل المرحل في حالة اشتغال.

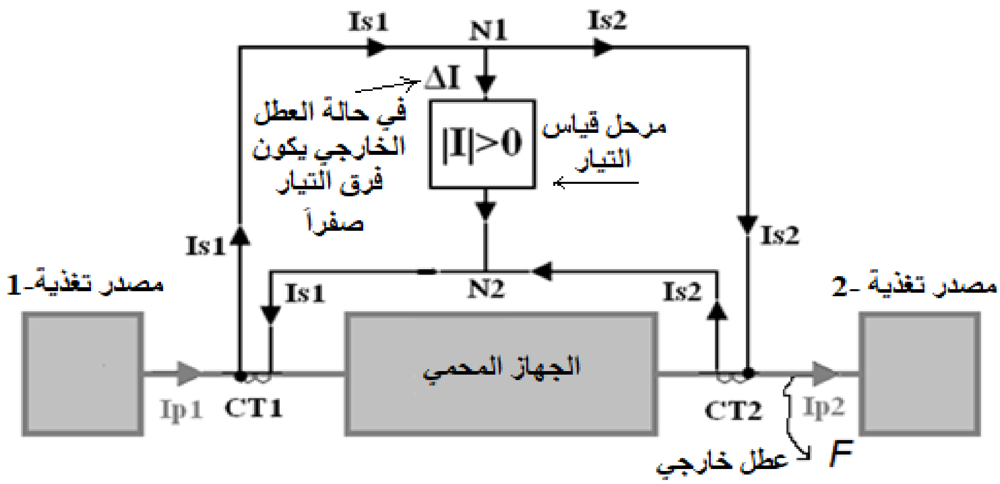
هناك صنفان أو نوعان للحماية الفرقية:

(أ) منظومات التيار الدوار، وتستخدم للمناطق القصيرة أو المحدودة (كالمولدات والمحولات، وقضبان التوزيع).

(ب) منظومات الفولتية المتوازنة، وتستخدم للمناطق الطويلة (كالمغذيات، وخطوط النقل) حيث تتحول التيارات الداخلة والخارجة من القطاع إلى فولتيات قبل مقارنتها (أو تتوازن مع بعضها).

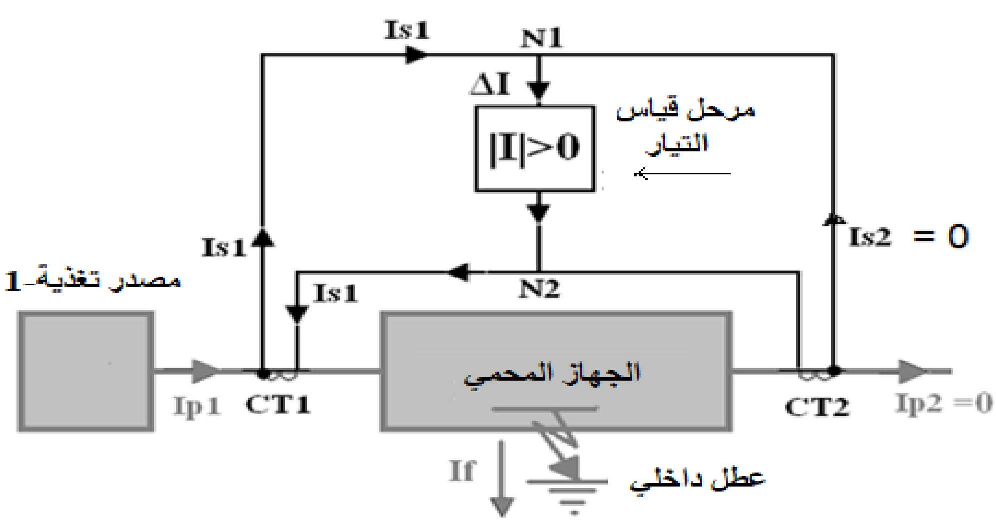
1-2-11 منظومات التيار الدوار CIRCULATING- CURRENT SYSTEMS

يبين الشكل 11-1 مخططاً لطور واحد للدائرة الأساسية لمنظومة التيار الدوار. وبفرض أن الحالة مثالية وكانت تغذية المنطقة من جهتين وعدم وجودعطل في الجهاز المراد حمايته (أي أنه في حالته الطبيعية) فإن التيارات الداخلة والخارجة من المنطقة سوف تكون متساوية، أي أن $I_{p1} = I_{p2}$. وإذا كانت محولات التيار متماثلة (متوافقة) والمرحل يكون في المركز الكهربائي للدارة المرشدة، فإن التيارات في نصفي الحلقة المرشدة I_{s1} و I_{s2} تكون متساوية ومتعاكسة في الإتجاه ($I_{s1} = I_{s2}$) ، عليه يكون مجموعها صفراً لعدم وجود فولتية عبر طرفي المرحل نفسه. هذه المنظومة تكون غير حساسة لتيار الحمل الإعتيادي أو لتيار عطل خارج منطقة الحماية كما موضح في الشكل 11-1. ويكون المرحل عادة من نوع المنتج المنجذب الكهرومغناطيسي.



الشكل 11−1 منظومة حماية وحدة ذات التيار الدوار مغذاة من جهتين ومعرض لعطل خارجي.

إذا كانت تغذية المنطقة من جهة واحدة فقط (عرفاً تكون من اليسار) كما في الشكل 10-2. عليه تكون التيارات في جهة اليمين صفراً ويسري تيار من جهة اليسار فقط في المرحل ليسبب إعتاق قاطع الدائرة، لهذا السبب وعند مراعاة حساسية منظومة حماية لعطل داخلي يفترض عادة كون التغذية من جهة واحدة. إن محول التيار الأيسر والذي يحمل تيار العطل $I_f = I_{p1}$ يقال عنه بأنه فعال بينما يقال عن محول التيار الأيمن بأنه معطل عن العمل (Idling) $I_{p2} = 0$، وبما أنه خلال



الشكل 11−2 منظومة حماية وحدة ذات التيار الدوار مغذاة من جهة واحدة ومعرضة لعطل داخلي.

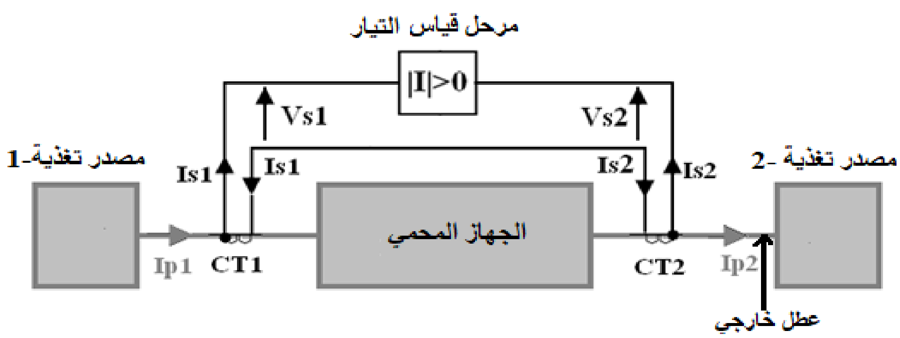
عطل داخلي يغذى من جهة واحدة فقط تظهر فولتية عبر المرحل وتكون تقريبا مساوية للفولتية التي تظهر عبر محول التيار المعطل عن العمل ويمر تيار في المرحل يؤدي إلى تشغيله وفصل قاطع الدائرة ، أي أن $\Delta I = I_{s1} \neq 0$. أن العطل الداخلي المغذى من جهة واحدة فقط يمثل أسوأ حالة في هذا النوع من منظومات الحماية.

2-2-11 المنظومات الحمائية ذات الفولتية المتوازنة

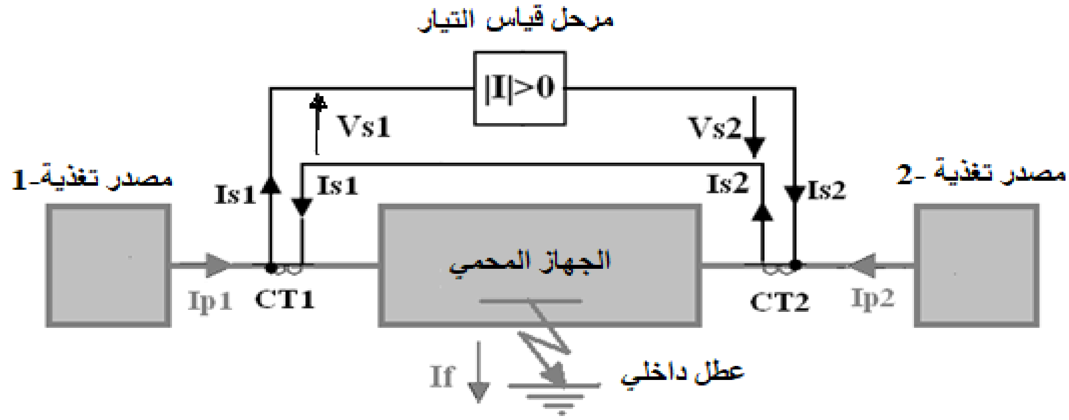
BALANCED VOLTAGE PROTECTIVE SYSTEMS

تكون حماية الوحدة أو الحماية الفرقية التي تعمل بمبدأ التيار الدوار ملائمة للقطاعات القصيرة والمحدودة مثل المولدات والمحولات. وإذا استخدمت مثل هذه المنظومات إلى مغذيات أو خطوط نقل طاقة أو كيبلات طولها يتجاوز كيلومترات متعددة، فإن القوى الدافعة الكهربائية المتولدة في ثانوي محولات التيار يكون المطلوب منها إمرار تيار حوالي 5 أمبير عند الحمل الكلي أو عدة أمثال هذا التيار خلال ظروف العطل الخارجي حول دائرة أسلاك مرشدة لها ممانعة عالية نوعا ما. مثل هذا العبء يكون غير عملي لأي تصميم اقتصادي لمحول التيار.

أحد الحلول لهذه المعضلة والذي استخدم سابقاً هو ربط أحد محولات التيار بصورة عكسية كما موضح في الشكل 10-3، فخلال عطل خارجي يمر تياران متساويان في ابتدائي المحولات $I_{p1} = I_{p2}$ بحيث تتعاكس القوتان الدافعتان الكهربائيتان لثانويي المحولين وتتساويان في المقدار $V_{s1} = V_{s2}$ حول الدائرة المرشدة وبذلك يكون كلا التيارين اللازمين لتشغيل المرحلين صفراً، أي $Is_1 = I_{s2} = 0$، $(I = 0)$، مما يؤدي غلى عدم اشتغال مرحل الحماية. أما إذا حدث عطل داخلي فسوف تغير إحدى القوتين الدافعتين الكهربائية إتجاهها بحيث يؤدي جمعهما الجبري إلى إمرار تيار في المرحل وتشغيله فوراً. انظر الشكل 11-4.



الشكل 11–3 منظومة حماية وحدة ذات الفولتية المتوازنة مغذاة من جهتين والعطل خارجي.



الشكل 11–4 منظومة حماية وحدة ذات الفولتية المتوازنة مغذاة من جهتين والعطل داخلي.

أما خصائص ومميزات ومحاسن الحماية الوحدية (وتسمى أيضا بالحماية الفرقية أو التفاضلية فتتلخص بما يأتي:

مبدأ اشتغالها بسيط

- يتم قياس التيار الداخل وقياس التيار الخارج من منطقة الحماية
- إذا كان هذان التياران غير متساويين فهذا يدل على وجود عطل

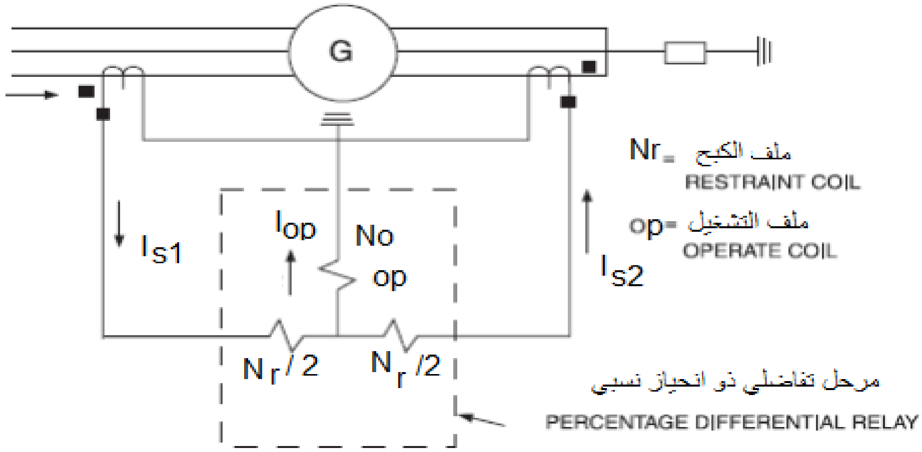
تتميز هذه الطريهة بكونها عالية الحساسية وعالية الإنتقائية والتمييز وبالتالي تكون سرعتها عالية.

11–2–3 مرحلات التيار التفاضلية ذات الإنحياز بنسبة مئوية

Percentage Differential Current Relay

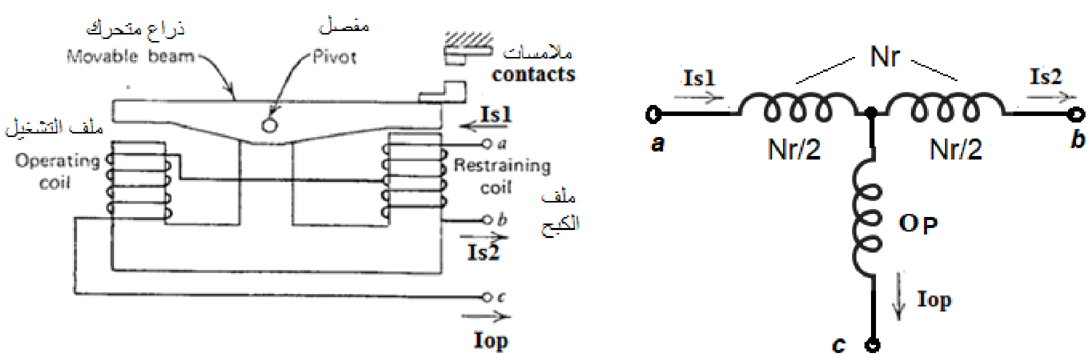
أن المرحل ذو المنتج المنجذب الإعتيادي المبين في الشكل11-1 قد يستعاض عنه بمرحل ذي إنحياز بنسبة مئوية معينة لتحسين أداءه؛ والمرحل المنحاز يحتوي على ملف تشغيل واحد عدد لفاته تساوي No ، وملفين اثنين عدد لفات كل واحد منهم يساوي Nr/2 متصلين كما موضح في الشكل 11-5 لكبح اشتغال المرحل. ملف التشغيل هو الذي يحمل التيار الخارج عن التوازن خلال عطل خارجي ويحاول تشغيل المرحل بينما ملف الإنحياز Nr الذي يكون ذا نقطة توصيل في منتصفه يحمل قيمة تيار العطل المكافئ في الثانوي ويحاول كبح المرحل.

قد يتألف المرحل المنحاز بنسبة مئوية من مرحلين من ذوات القطب المظلل يعملان على القرص نفسه ولكن ينتجان عزمين متعاكسين. أو قد يكون مرحل ذي العارضة المتوازنة Balanced beam، الشكل11-6، الذي يحتوي على ملف التشغيل (op) الذي يحمل التيار الخارج



الشكل 10–5 منظومة حماية وحدة فرقية ذات انحياز بنسبة مئوية.

عن التوازن (المراق) خلال عطل خارجي يحاول تشغيل المرحل بينما ملف الإنحياز (Nr) الذي يكون ذا نقطة توصيل في منتصفه يحمل قيمة تيار العطل المكافئ في الثانوي ويحاول كبح المرحل.



(ب) (أ)

الشكل 11–6 المرحل المنحاز : (أ) ارتباط دائرة الملفات، (ب) المرحل ذي العارضة المتوازنة.

خلال العطل الخارجي (النافذ)، يحمل كلا نصفي ملف الإنحياز Nr تيارات كبيرة، والأمبير-لفة لهما يجمعان مع بعضهما البعض؛ بينما ملف التشغيل OP يكون حاملاً لتيار صغير غير متوازن لا يكفي لاشتغال منظومة الحماية. وخلال عطل داخلي مغذى من جهتين فأن التيار الأيسر المرشد Is_1 يقاس اتجاهه بحيث يكون فعل ملف الانحياز ضعيفاً وفعل ملف التشغيل I_{op} قوياً. أما خلال عطل

داخلي مغذى من جهة واحدة فقط فيكون تيار المرشد الأيسر صفراً. وعليه سيمر التيار نفسه في ملف التشغيل وكذلك في نصف ملف الانحياز. لهذا يجب تصميم المرحل لكي يشتغل تحت هذه الظروف. وللمرحلات ذات الأقطاب المظللة والمتشابهة التصميم يجب أن يحتوي ملف التشغيل فيها على عدد لفات يزيد عن نصف عدد لفات ملف الانحياز.

إن قيمة الانحياز للمرحل هو نسبة عدد اللفات في ملف الانحياز إلى عدد اللفات في ملف التشغيل معبر عنها بالنسبة المئوية، أي أنه يمكن تعريف الإنحيازبكونه النسبة k بين عدد لفات ملف الإنحياز الى عدد لفات ملف التشغيل، أي أن :

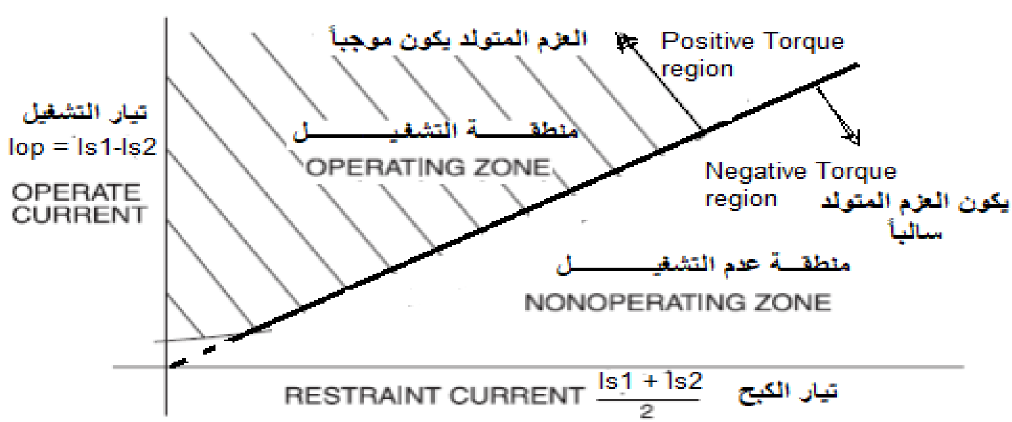
$$\%bias = \frac{N_r}{N_o} = k$$

حيث k هذه تكون ثابتة، فبالنسبة للمولد تتراوح من 10 إلى 20 % ويكون الانحياز 10% وللمحول يكون تنظيمها 20% أما الانحياز فيؤخذ من 10 إلى 40% لخطوط النقل بصورة عامة.

لنتدارس الآن اشتغال المرحل المنحاز في الظروف الطبيعية عندما لايكون هناك عطل خارج منطقة الجهاز المحمي سواء كان محول أو مولد أو خط نقل أو عدم وجود عطل داخلي ضمن الجهاز نفسه. في هذه الحالة:

- فرق التيار المار في ملف التشغيل سوف يكون متناسبا مع Is_1-Is_2 . أي أن $I_{op} = Is_1-Is_2$.
- التيار المكافئ المار في ملف الإنحياز سوف يتناسب مع نصف مجموع تياري الملف Nr ذلك لأنهما متماثلين تماماً. عليه فان تيار الكبح يكون : $½ (Is_1+Is_2)= I_{rest}$

أما خواص المرحل فستكون كما هي موضحة في الشكل 11-7.



الشكل 11−7 خصائص المرحل المنحاز.

التحليلات الرياضية الخاصة بالمرحل المنحاز

في المرحلات الكهرومغناطيسية تتناسب القوى الميكانيكية المتولدة فيها مع مربع القوى الدافعة المغناطيسية. ولكي يعمل المرحل يجب أن يكون مربع القوة الدافعة المغناطيسية المتولدة في ملف التشغيل mmf_{op} أكبر من مربع القوة الدافعة المغناطيسية المتولدة في ملف الكبح mmf_r ، أي أن:

$$mmf_{op} = (I_{s1}-I_{s2})\, N_o$$

$$mmf_r = ½\, (I_{s1}+I_{s2})\, N_r$$

وبفرض علاقات خطية. فإن المرحل سوف يعمل عندما

$$(mmf_{op})^2 > (mmf_r)^2$$

أو أن

$$(I_{s1}-I_{s2})\, N_o > ½\, (I_{s1}+I_{s2})\, N_r$$

$$(I_{s1}-I_{s2})\, N_o > ½\, (I_{s1}+I_{s2})\, k\, N_o$$

$$I_{s1} > (½\, (I_{s1}+I_{s2}))\, k + I_{s2}$$

$$I_{s1} - (k/2)\, I_{s1} > (½\, I_{s2})\, k + I_{s2}$$

$$I_{s1}\,(1-½\, k) > I_{s2}\,(1+½\, k)$$

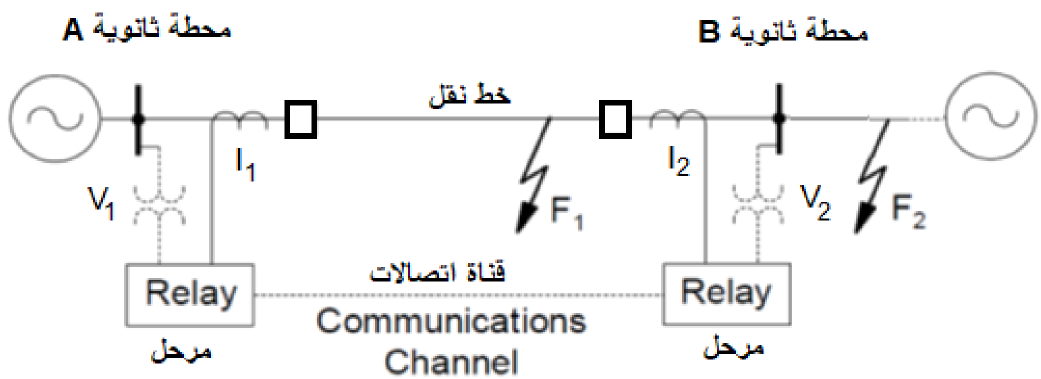
$$I_{s1} > \frac{(1+\ ½\,\mathrm{k})}{(1-\ ½\,\mathrm{k})}\, I_{s2} \quad or \quad I_{s1} > \frac{(2+\ \mathrm{k})}{(2-\ \mathrm{k})}\, I_{s2}$$

3-11 حماية خطوط النقل باستخدام الحماية الدليلية أو الحماية عن بعد

حماية خطوط النقل باستخدام المرحلات المحكومة عن بعد هي إحدى الطرق البديلة عالية الدقة التي استعملت منذ وقت طويل وخاصة للخطوط القصيرة ذات فولتية 115 كيلو فولت أو أكثر. كذلك تمتاز هذه الطريقة بسرعتها العالية في الحماية وتمييزها للعطل إذا كان على الخط نفسه أو خارجه بدقة كبيرة. ولغرض المقارنة، يمكن تقسيم الحماية الدليلية إلى مجموعتين: (أ) المنظومات التي تعمل بالتيار فقط، (ب) المنظومات التي تعمل بالمقارنة الإتجاهية. وتحتاج طريقة الحماية هذه

الى قناة اتصال مثل خط هاتف أرضي أو كيبل تحكم أو أية وسيلة اتصال أخرى لنقل بيانات عن التيار والفولتية إلى أماكن السيطرة والتحكم، الشكل 11-8. إن الهدف الرئيسي من استخدام المرحلات من هذا النوع هو للسيطرة على قواطع الدائرة المتواجدة لحماية الخطوط جميعها عن بعد.

هناك أربعة أنواع تستخدم كقنوات أساسية للاتصالات يمكن في هذا المشروع الحمائي:



الشكل 11- 8 حماية خط نقل بمنظومة حماية وحدة فرقية باستخدام أسلاك دليلية (مرشدة) بوصفها قناة إتصالات.

1- خط هاتف مستقل (قد يكون سلك أو كيبل من النوع المستخدم للهواتف) يستأجر من هيئة الاتصالات والبريد وهذه الطريقة يطلق عليها الحماية بالأسلاك المرشدة (الدليلية) المحملة بالمعلومات سواء كانت معلومات رقمية أو تناظرية.

2- منظومة اتصالات مايكرويف باستخدام صحون قابلة للتوجيه. تمتاز هذه الطريقة بسعتها العالية لنقل المعلومات وتكون إما رقمية أو تناظرية وخالية من تداخل الترددات الخارجية وخاصة تردد خط النقل نفسه.

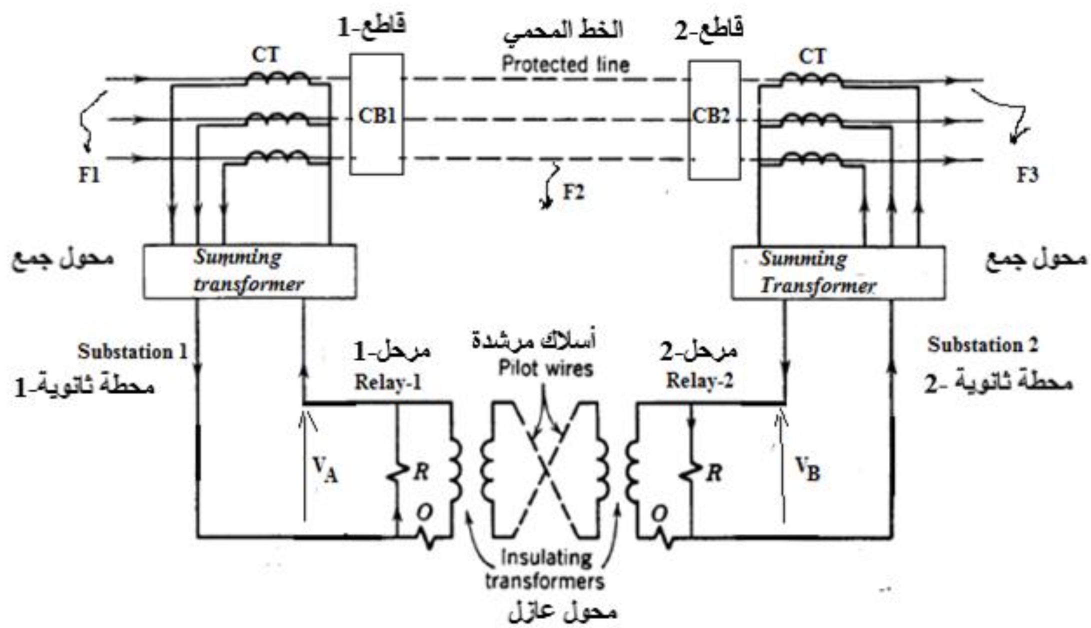
3- كيبل ألياف ضوئية، تمتاز هذه الطريقة بالأمنية العالية ضد الضوضاء والتشويش الخارجي. لكن من مساوئها صعوبة تغيير مسارات هذه الكيبلات في حالة تبديل مسارات الخطوط عند اجراء توسيع في الشبكات الناقلة.

4- استخدام خط نقل القدرة نفسه كوسط حامل للمعلومات والذي يطلق عليه خط القدرة المحمل PLC (Power line carrier). هذه الطريقة تمتاز بوثوقيتها العالية في الإشتغال لكن هناك مشكلة تداخل الضوضاء الناشئة عن تردد الخط نفسه.

4-11 حماية خطوط النقل باستخدام المرحلات الفرقية ذات الأسلاك الدليلية (المرشدة)

Transmission lines protection using pilot wire differential relays

المبدأ الأساسي للحماية الدليلية هي استغلال مبدأ حماية الوحدة بالمرحلات التفاضلية باستخدام أسلاك دليلية (مرشدة) للربط بين هذه المرحلات التي تكون عادة بعيدة عن بعضها البعض، لذلك تسمى هذه الحماية بالحماية السلكية البعيدة Teleprotection أيضاً. وهي منظومة حماية عالية السرعة تصمم لحماية خطوط النقل وخطوط التوزيع القصيرة التي لاتتجاوز أطوالها 40 كيلومتر. وتحتاج طريقة الحماية هذه إلى قناة اتصال مثل خط هاتف أرضي أو كيبل تحكم وعلى مرحلين يوضعان في بداية الخط ونهايته كما موضح في الشكل 11-9.



الشكل 11-9 حماية خط نقل قصير بواسطة المرحلات ذات الأسلاك المرشدة ، R هو ملف الكبح و O هو ملف التشغيل.

يتم ربط المرحلين إلى بعضهما بواسطة سلك مرشد يحتوي على موصلين معزولين كأسلاك الهاتف العادية. التيارات الخارجة من محولات التيار الثلاثة (المتماثلة في الصنع) يتم تغذيتها إلى محول جمع الذي ينتج تيار واحد هو حاصل جمع التيارات الثلاثة، هذا التيار يتناسب مع تيار الخط ويكون له القطبية نفسها لاتجاه جريان التيار. كذلك تكون وظيفة هذا المحول هوتحويل التيار الخارج منه إلى فولتية لكي تتعامل معها المرحلات التفاضلية التي تعمل على فرق الفولتية وليس فرق التيار.

نظرية الإشتغال:

- عندما يكون العطل خارج نطاق المنطقة المحمية أي خارج خط النقل عند F_1 و F_3 تتساوى الفولتيتان V_A و V_B على مدخلي المرحلين 1 و 2 ، ($V_A = V_B$) لذا لا يعمل أي من المرحلين المذكورين .
- إذا حدث عطل داخلي على طول خط النقل عند F_2 فإن الفولتيتين $V_A \neq V_B$ وبذلك سوف يعمل المرحلان ويقومان بفصل قاطعي الدائرة CB1 و CB2 في آن واحد لحماية الخط.
- إشارة الفولتية التي تحملها الأسلاك المرشدة هي 30 فولت بتردد 50 هرتز (فولتية متناوبة) أو 20 فولت بتردد 60 هرتز.
- يتم استخدام سلك مضفور(مجدول) لمنع التداخل الراديوي والكهرومغناطيسي مع إشارة الفولتية المرسلة بين القاطعين للحيلولة دون حدوث اشتغال خاطئ لهما.

11–4–1 محولات الجمع Summation Transformers

تستخدم المنظومات الحمائية الحديثة للمغذيات وخطوط النقل عادة محولات جمع (الشكل11-9) حيث تكون محاسنها كالآتي:

(أ) تكون محولات التيار في الخطوط من النوع الشائع التصميم وتشتغل بدائرة ذات عبء واطئ.

(ب) يتم تغذية خرج محول الجمع إلى منظومة لها سلكين مرشدين وهذا الخرج يكون متيسراً لأي نوع من العطل على أي من الخطوط الابتدائية. لما كانت جهتا منظومة حماية المغذي متشابهة. فإن المنظومة المرشدة تستطيع أن تشتغل بوصفها منظومة فولتية متوازنة.

إن بنية محول الجمع تكون مشابهة تماماً لبنية محول تيار؛ إلا أن الابتدائي يكون له مآخذ متعددة ويمكنه أن يشتغل اعتيادياً ودائرة الثانوي له مفتوحة. ويحتوي ابتدائي محول الجمع على لفات قليلة من الأسلاك، وهو مصمم بحيث أنه حتى إذا كان الثانوي له مفتوحاً. فإن العبء المسلط على

محولات التيار يكون واطئاً إلى الحد الذي يكفي لجعل تصميم محولات التيار ضمن الضوابط الشائعة.

لتكن I و m و n وعدد اللفات في المقاطع الثلاثة للابتدائي. فعطل أرض على الطور a سوف ينشئ تياراً ثانوياً في اللفات (i+m+n) بينما عطل طور إلى طور عبر الطورين b و c سوف يمرر تياراً يدور في m عدد من اللفات. ولعطل داخلي لمنظومة معينة متغذية من طرف واحد فقط ذات مرحل موضوع عند ذلك الطرف من نقطة التشغيل، سيكون خرج محول الجمع بالفولت امبير (VA) وكذلك الدخل بالامبير - لفات له ثابتين لجميع أنواع هذه الأعطال (يجب إضافة تيارات المغنطة وفقد الحديد المناظرة إلى تيار التشغيل) لهذا سوف يكون تنظيم العطل لنوع معين من العطل متناسياً عكسياً مع عدد اللفات (تناسب حقيقياً أو نسبيا) لابتدائي محول الجمع التي تكون فعالة لهذا العطل. وإذا أعطي تنظيم عطل معين وكذلك i.n.m فإن جميع تنظيمات العطل الأخرى يمكن حسابها. هذا الاعتماد الضمني لتنظيمات العطل هو من أحد مساوئ محول الجمع ولكنه غير مهم في أكثر الأحيان لأن تنظيمات عطل أرض مثلاً يمكن تقليلها (جعلها أكثر حساسية) بزيادة n بدون التأثير على تنظيمات عطل الطور إلى الطور التي لا تعتمد على قيمة n. وبما أن المنظومة الحمائية هي منظومة وحدة، فليس من الضروري جعل تنظيمات عطل الطور إلى الطور أكبر من تيار الحمل الأقصى.

2-4-11 الأسلاك المرشدة Pilots Wires

لغرض حماية كيبلات القدرة المدفونة تحت الأرض فإن مرشد الحماية يمد اعتيادياً في وقت مد كيبلات القدرة نفسها. لما كانت المتطلبات والتحديدات على استخدام حجم السلك قليلة، ومسار الطول له اعتيادياً أقل من 15 كيلومتر؛ فإن مثل هذه المرشدات يشار إليها بالمرشدات ذات الممانعة المنخفضة. أما بالنسبة لخطوط القدرة العلوية المعلقة فتكون المسألة أصعب بكثير فالمرشدات المعلقة على الأبراج نفسها مع خطوط القدرة تعد آخر حل يتم اللجوء إليه. لذلك تستخدم كيبلات الهاتف المدفونة التي تمد عادة مع وقت انشاء الأبراج للخطوط وبجانب مساراتها. وقد تكون المرشدات المدفونة مستأجرة من شركات الاتصالات أو البريد والبرق وهي على نوعين: الخط البريدي أو الخط الهاتفي الخاص.

إن متطلبات دوائر البريد تقضي بأن فولتية المرشد يجب أن تحدد بقيمة 130 فولت (قيمة ذروة) ويحدد التيار إلى 60 ملي أمبير (ج. م. ت) وتكون هذه المرشدات البريدية اعتيادياً معرضة إلى المراقبة المستمرة بواسطة مشرفي الحماية لغرض كشف أي تداخل كهرومغناطيسي معها إن وجد.

ومع تطور منظومات الاشراف لأغراض السيطرة البعيدة في منظومة القدرة باستخدام الكيبلات الهاتفية المتعددة الأسلاك فإنه قد يصبح من الإقتصادي إضافة واجبات مشرف الحماية إلى منظومة الهاتف نفسها. أن مثل منظومات الهاتف الخاصة هذه تكون تحت اشراف أو سيطرة مسؤولي توليد الطاقة الكهربائية وذلك لكي تكون أقل عرضة للتداخل. إن المرشدات الهاتفية التي تحتوي على أسلاك دقيقة التي قد تصل أطوالها إلى مسافة 50 كيلومتر يشار إليها في هذه الحالة بالمرشدات ذات الممانعة العالية. وتكون هذه الأسلاك خفيفة العزل وقريبة جدا من بعضها البعض وبذلك تكون لها متسعة كبيرة تتطلب تيار شحن كبير على طول الخط.

5-11 حماية خطوط النقل الطويلة

إن حماية الخطوط باستخدام المرحلات ذات الأسلاك المرشدة تكون عادة لخطوط نقل بطول مسار بحدود 30 – 40 كيلومتر. وهذه إحدى المحددات الرئيسية لهذه الطريقة. ولحماية الخطوط العلوية المعلقة التي تمتد لمسافات طويلة تستخدم احدى الطريقتين التاليتين:

(أ) الحماية الحاملة Carrier protection

(ب) الحماية المسافية Distance protection

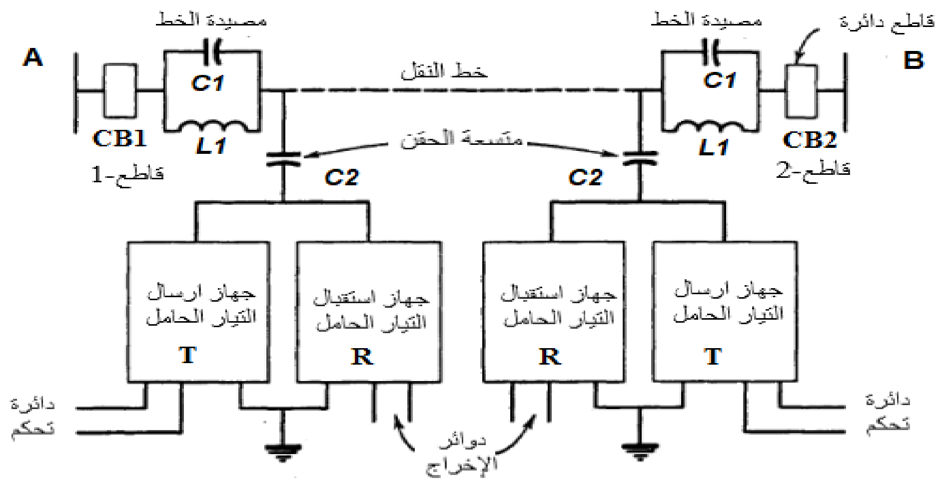
6-11 الحماية الحاملة Carrier protection

إن الحماية الحاملة لا تلغي حقيقة الأسلاك المرشدة لكنها تستخدم خطوط القدرة نفسها أسلاكاً مرشدة. وللاختصار تستخدم منظومة الحماية الحاملة لحماية الخطوط الطويلة المهمة وذات الفولتية العالية ؛ والمباديء الأساسية لهذه المنظومة تكون بسيطة ولكن تطبيقاتها العملية معقدة وغالية. والحماية الحاملة هى منظومة حماية وحدة. وتحدد المنطقة المحمية بها بمواقع مجموعتي محولات التيار .C.T.s ويستخد م هذا النوع الحماية خط القدرة نفسه كقناة لنقل المعلومات بهيئة اشارة تردد عالٍ مضمنة Modulated تأخذ بعين الاعتبار الظروف عند نهايتى الخط. ويلزم المنظومة الحاملة أجهزة الكترونية باهضة التكاليف لتوليد إشارة منخفضة القدرة ذات تردد عالي يتراوح بين 80 إلى 500 كيلوهرتز، وكذلك متسعات فولتية عالية غالية الثمن لحقن هذه الاشارة إلى موصلات خط نقل القدرة من كلا طرفيه. أنظر الشكل 11- 10.

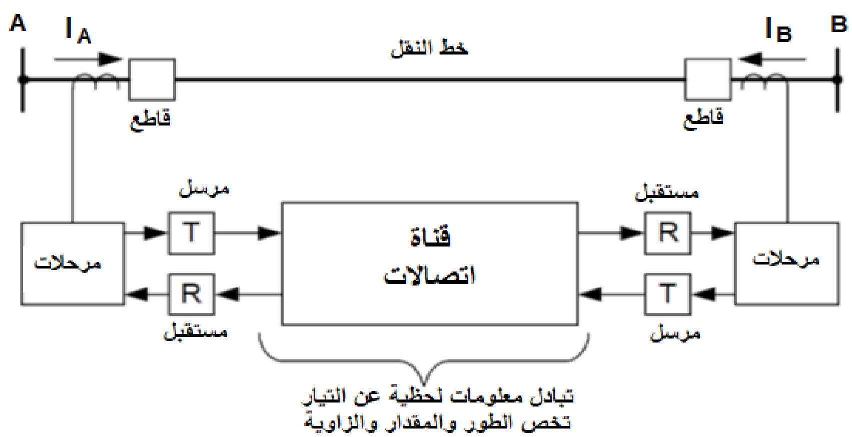
المبدأ الأساس للحماية الحاملة هو أن التيار I_A الداخل والتيار I_B الخارج من المنطقة AB في حالة الحمل وكذلك في ظروف العطل الخارجي يكونان متساويين تقريبا في الطور بالنسبة الى فولتية

المنظومة. الشكل 11-11. بينما يكون هذان التياران في تضاد طوري تقريبا لعطل د داخلي (أو أن أحد هذين التيارين يكون صفراً)، الشكل 11-12. هذان التياران يبدان بنقل اشارات التردد العالي من كل جهة من نهاية الخط والى الأخرى.

وعند كلتا النهايتين تتم مقارنة إشاراتي التردد العالي المحلية والبعيدة المضمنتان Modulated signals ، فإذا أشرتا أن هناك وجود عطل خارجي عندئذ تستقر الحماية ولا تعمل وخلاف ذلك؛ فانها سوف تفصل قاطع الدائرة الموقعي. وبما أن خط القدرة عندما يحمل إشارة ذات تردد عالي فسيعمل هوائياً يشع طاقة الأشارة بحيث انها تتضاءل خلال النقل وبكمية متغيرة تعتمد على الظروف الجوية المحيطة.

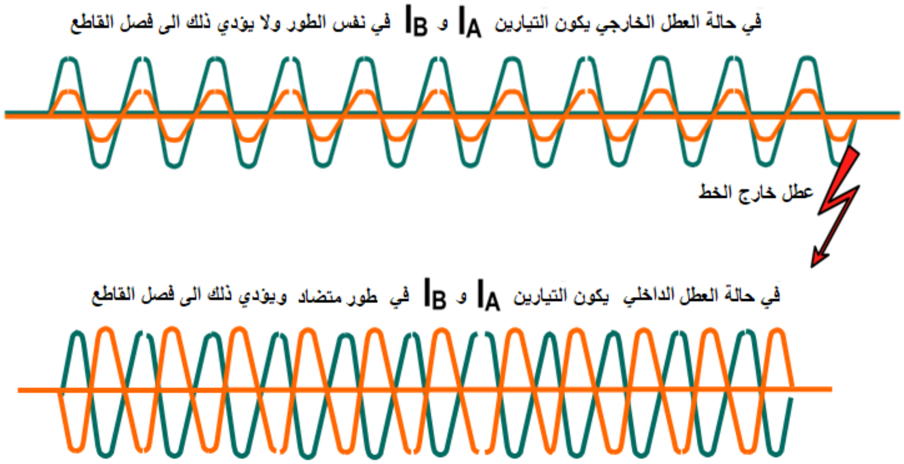


الشكل 11- 10 منظومة الحماية الحاملة .



الشكل 11- 11.

لذلك فإن إزالة تضمين الأشارة المستلمة (Demodulation) عند إحدى النهايتين لايمكنه اعطاء معلومات تخص مقداراتساع التيار عند النهاية الأخرى، لذلك فإن هذه الأشارة المستلمة تنقل معلومات تخص طور التيار فقط. ومن سياق الكلام فأنه من المفيد أن يقاس الطور بوصفه دالة للزمن وذلك باستخدام نقاط الصفر اللحظية لموجة التيار ولا يعتمد على مقدار التيار نفسه. والحماية بهذه الطريقة تسمى "الحماية بمقارنة الطور".



الشكل 11- 12.

وفيما يلي شرح لبعض الأجهزة المهمة في الحماية الحاملة:

جهاز ألإرسال T (المرسل): يعطى هذا الجهاز خرجاً يتراوح بين 10 و20 واط. ولأسباب اقتصادية يكون المرسل من النوع ذي الأمرار للنطاق العريض القياسي بحيث يغطي المدى الكلي للترددات الحاملة.

جهاز الإستلام R (المستلم): يكون هذا الجهاز ذا نطاق عريض يغطي مدى الترددات الحاملة. ويشتمل على مرشح دخول بإمرار نطاقي ضيق منغم إلى تردد الحماية الحاملة المستخدمة: ويجب أن يرفض إشارات الاتصالات الأخرى. فمثلاً لخرج جهاز مرسل مقداره 10 واط وتضاؤل إرسال كلي قدره 30 ديسبل dB، يكون دخل جهازالإستلام في هذه الحالة 10 ملي واط. ويقلل محدد دخول الأشارات المحلية والبعيدة إلى المقدار نفسه. ويجب أن يكون جهاز المستلم غير حساس إلى التداخل (الضوضاء الراديوية) من أقواس الشرارة الحادثة في فواصل قطع الحمل وقواطع الدائرة وكذلك

الأعطال وكذلك من الضجيج من الخطوط ذاتها. حيث أن مثل هذا التداخل قد يؤخر عملية الإعتاق للقاطع لعطل داخلي.

متسعة حقن الإشارة (جهاز اقتران الخط):

إشارة إلى الشكل 11- 10، إن متسعة حقن الإشارة C_2 (2000 بيكوفاراد) هي عبارة عن عدد من المتسعات متوالية الربط ومقننة عند فولتية خط إلى محايد للخط النقل وتصمم لتكون داخل عازل يتحمل فولتية عالية. مفاعلة هذه المتسعة تكون عالية القيمة عند ترد د القدرة ومنخفضة عند تردد الموجة الحاملة. أما L_1 (100 ميكروهنري) و C_1 فهي عبارة عن جهاز ترشيح يسمى بمصيدة الخط Line Trap (مصيدة الموجة) ويكون مثبت اعتيادياً في قمة عازل للفولتية العالية، أنظر الشكل 11-13، ومنغم إلى تردد الموجة الحاملة بحيث أن الأشارة الحاملة توجه نحو المنطقة المحمية أي



الشكل 11-13 مصائد الخط لفولتية 500 كيلوفولت ومتسعة الإقتران.

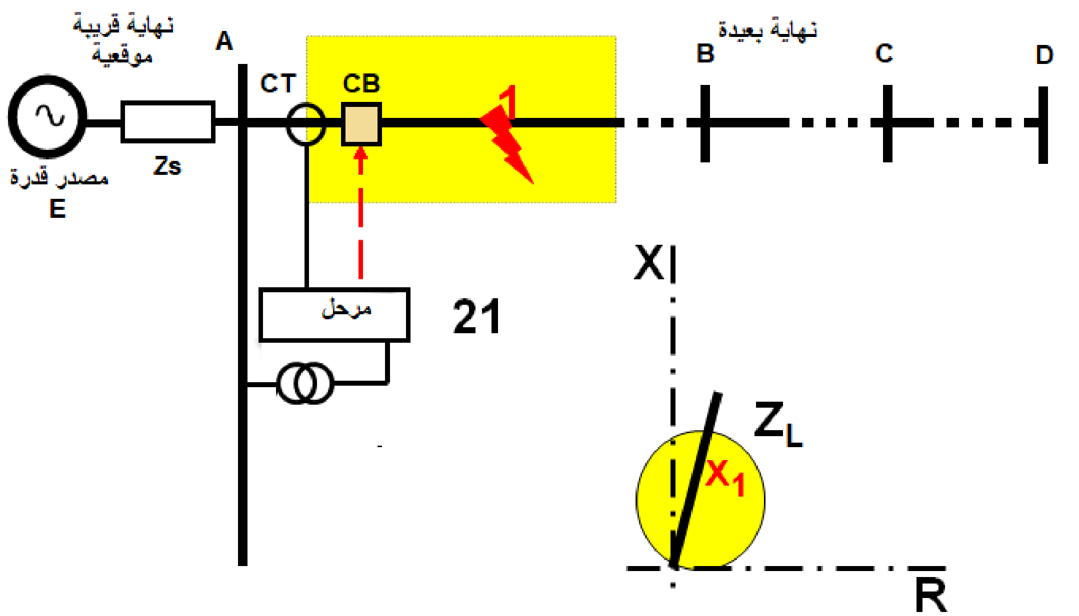
يتم حصرها داخل الخط نفسه وعدم السماح لها بالخروج من أي من نهايتي خط النقل. ويصمم L_1 كهربائياً بحيث يحمل تيار الحمل بصورة مستمرة وكذلك يصمم ميكانيكاً ليصمد ضد تيار العطل الأقصى عند حدوثه. ومن الممكن استخدام طور واحد فقط مع سلك العودة الأرضي، لكن المعتاد عملياً والثابت هو استخدام طورين إثنين لأن هذا يقلل الأشعاع من الخط وبذلك يقلل من تضاؤل الأشارة لكنه يضاعف تقريبا كلفة جهاز الإقتران.

وللتأكد من أن جهاز الحماية الحاملة يعمل بصورة صحيحة. يتم إرسال إشارات فحص بصورة ذاتية كل نصف ساعة إلى النهاية البعيدة وتستلم عند رجوعها إلى النهاية الموقعية: وهذا الاسلوب لا يفحص دائرة الإعتاق لقاطع الدائرة.

البديل الآخر لإرسال الموجة الحاملة على خط القدرة هو استخدام الإتصالات الراديوية في مدى الترددات العالية جدا .v.h.f أو الأكبر منها ذلك لأن هذه الترددات تكون إتجاهية بصورة كبيرة وارسالها يمكن ان يكون مستمراً وكذلك بسبب إتساعها لعدد كبير من القنوات لذا يمكن استخدام هذه الترددات لغرض الحماية والسيطرة والإتصال ونقل البيانات إلا إنها تكون محدودة لخطوط النقل بطول حوالي 60 كم إلا إذا استخدمت مقويات أو معيدات (repeaters) باهضة التكاليف.

7-11 الحماية المسافية (الممانعية) Distance (Impedance) protection

يبين الشكل 11- 14 (أ) خطا شعاعياً بسيطا. في البداية أفرض للسهولة إن التوليد يكون في قضيب التوزيع A فقط وليس هناك تغذية لعطل ما في قضبان التوزيع الأخرى. كما يبين الشكل نفسه منظومة حماية مسافية منصوبة على الخط AB عند الموقع A (أوالنهاية الموقعية)، الغرض منها حماية الخط AB (كما يسمى بالمنطقة المحمية) ضد تغذيات العطل لقضيب التوزيع A، أما النهاية B فتسمى بالنهاية البعيدة.



الشكل 11-14 الحماية المسافية لحماية الخط AB.

أفرض حدوث عطل دائرة قصيرة ثلاثي الطور على الخط AB، ولتكن Z_f ممانعة الخط من نقطة المرحل عند A إلى نقطة العطل (الممانعة الابتدائية). في هذه الحالة تكون الفولتية على ابتدائي محول الفولتية (VT) هي:

$$V = EZ_f/(Z_s + Z_f) \tag{11.1}$$

ويكون تيار العطل

$$I = E/(Z_s + Z_f) \tag{11.2}$$

ويقوم المرحل بمقارنة قيم الثانوي لمحولي الفولتية V والتيار I (لذا يسمى أحياناً بالمقارن) في الدائرة المبينة في الشكل 11-15 بحيث يقيس نسبتيهما والتي هي عبارة عن ممانعة مقاسة تسمى Z_m حيث

$$Z_m = \frac{V/VT \text{ نسبة}}{I/CT \text{ نسبة}}$$

أو

$$Z_m = Z_f \frac{CT \text{ نسبة}}{VT \text{ نسبة}} \tag{11.3}$$

وتسمى Z_m وهي الممانعة المقاسة Measured impedance (الظاهرة عند أطراف المرحل)، بالممانعة الثانوية Secondary impedance ، وتسمى الممانعة Z_f أيضاً بالممانعة الإبتدائية Primary impedance .

11-6-1 أنواع المرحلات المسافية Types of Distance Relays

بصورة عامة هناك أربعة أنواع من المرحلات المسافية:

1- المرحل الممانعي (مرحل أوم) Impedance relay (Ohms relay)
2- المرحل المسامحي Admittance relay (Mho relay)
3- المرحل المفاعلي Reactance relay
4- المرحل المسامحي المنزاح Offset Mho relay

المرحل الممانعي هو أبسط أنواع المرحلات المسافية وهو يقوم على مبدأ حساب الممانعة بموجب قانون أوم وذلك بقسمة الفولتية على التيار ويكون على نوعين:

- المرحل البسيط اللااتجاهي Plain relay وهو الذي يستجيب إلى العطل الذي أمامه وفي نفس الوقت يتحسسس للعطل الذي يقع خلفه.
- المرحل الإتجاهي Directional وهو الذي يستجيب إلى العطل الذي أمامه فقط ولا يتحسسس للعطل الذي يقع خلفه.

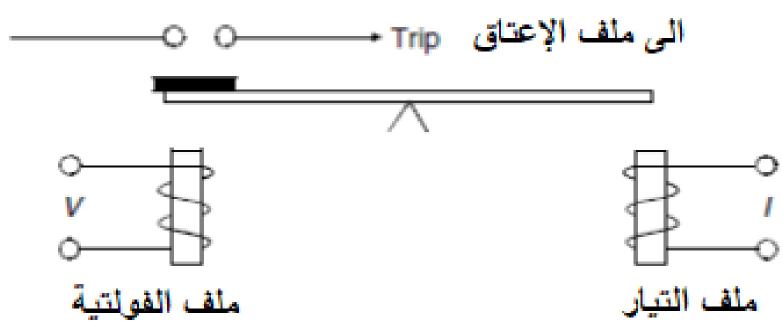
وتصنع المرحلات الممانعية إما بالتصاميم الكهرومغناطيسية القديمة مثل المرحل ذو العارضة المتوازنة Balanced beam relay أو مرحل ستاتيكي الذي يسمى بالمقارن أو أن يكون مرحل محوسب رقمي حديث . وكل هذه الأنواع موجودة في العمل في الوقت الحاضر.

2-7-11 المرحل ذو العارضة المتوازنة Balanced beam relay

لغرض فهم نظرية اشتغال هذا المرحل الذي يعد من أوائل المرحلات التي استخدمت في الحماية المسافية، من المفيد أن ننظر إلى الشكل 11-15. في هذا الشكل؛ يتم تغذية أحد الملفين بالفولتية لتوليد عزم التقييد أو الكبح T_r، والملف الثاني يتم تغذيته بالتيار لتوليد عزم التشغيل T_o.

في حالة الظروف الطبيعية الإعتيادية يكون مقدار الفولتية عال جداً بحيث يولد عزم كبح كبير مما يقيد عمل المرحل (يجعل ملامساته مفتوحة) وذلك عندما يكون التيار في الحمل الإعتيادي بحيث يولد عزم صغير نسبياً.

في حالة حدوث عطل (قصر دائرة مثلاً) فان الفولتية تؤول إلى الصفر تقريبا وبعكسها سيزيد مقدار التيار إلى اضعاف مضاعفة مما يؤدي إلى إنتاج عزم تشغيل عالٍ جداً يقوم بتشتغيل المرحل



الشكل 11-15 مرحل مسافي ذو العارضة المتوازنة.

وبالتالي إلى فصل أو إعتاق قاطع الدائرة. والمعادلات الرياضية التالية تبين إشتغال المرحل المذكور:

العزم المتولد لملف الفولتية : $T_r = K_1 V^2$

العزم المتولد لملف التيار : $T_o = K_2 I^2$

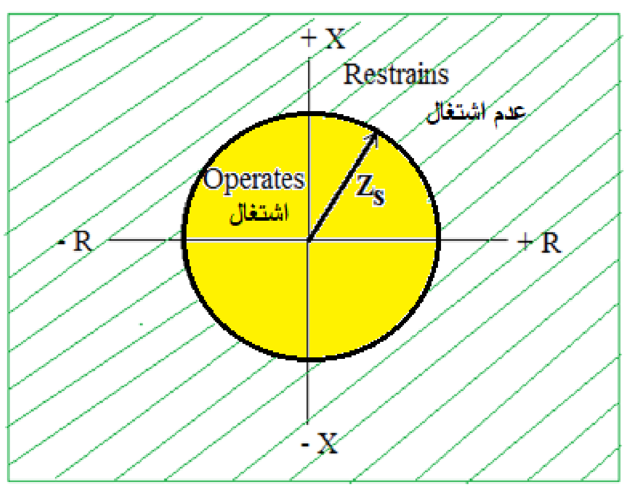
حيث K_1 و K_2 هما ثوابت .

واذا كان المرحل في حالة توازن، فيجب ان يكون $T_r = T_o$ أو $K_1 V^2 = K_2 I^2$

عليه و لأجل ان تغلق ملامسات المرحل يجب أن يكون $T_r < T_o$ أو $K_1 V^2 < K_2 I^2$

$$\frac{V^2}{I^2} = \frac{K_2}{K_1} \quad \rightarrow \quad \frac{V}{I} < \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \quad \rightarrow Z < \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}$$

لذلك فان المرحل سوف يعمل إذا نظر فوجد أن الممانعة تكون أقل من قيمة محددة مسبقا وهي Z_s مثلاً. انظر الشكل 11- 16. وإذا أردنا ان نرسم خصائص المرحل الممانعي العادي في مستوى الممانعة *R-X* فان حدود منطقة إشتغال المرحل تكون عبارةعن دائرة مركزها في نقطة الأصل كما موضحة في الشكل 11-16 ويكون نصف قطرها هو قيمة الممانعة التي سيضبط عليها اشتغال المرحل نفسه.



الشكل 11- 16 خصائص المرحل الممانعي البسيط.

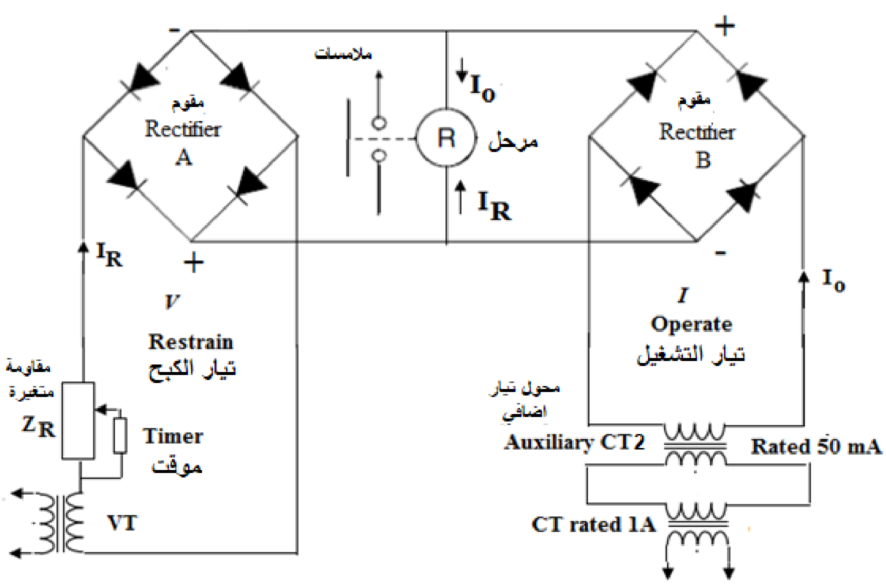
فمثلا اذا تم ضبط اشتغال المرحل على $Z_s = 10\Omega$ وحدث عطل بحيث أن المقاومة المقاسة $Z_m = 8\Omega$ فإن المرحل سوف يشتغل لأن العطل سيكون داخل منطقة خط النقل، أما إذا كانت الممانعة المقاسة $Z_m = 12\ \Omega$ فان المرحل سوف لا يعمل لأنه يعتبر أن العطل خارج الخط.

3-7-11 المرحل المسافي الممانعي الستاتيكي ذو القنطرة المقارنة

Bridge comparator static impedance type distance relay

الأسلوب الحديث للحصول على تصميم مرحل ستاتيكي يعطي العمل بالخواص نفسها للمرحل ذو العارضة المتوازنة هو باستخدام الدائرة المبينة في الشكل 11- 17 الذي يدعى بالمرحل المسافي المقارن. ومختصر نظرية الإشتغال للمرحل المسافي المقارن هو كالآتي:

- في هذه الدائرة يتم تحويل خرج محول الفولتية VT الى تيار I_R الذي يمثل تيار الكبح.
- تيار التشغيل Io يتم تجهيزه بواسطة محول تيار الخط CT.
- يتم تحويل كل من I_R و Io إلى كميات قياسية جبرية بواسطة قنطرتي تقويم (توحيد اتجاههما وتحويلهما إلى تيار مستمر) .
- يتم ادخال التيارين إلى المرحل والفرق بينهما سيكون تيار التشغيل $Io - I_R$.
- يعامل محول التيار الإضافي (المساعد) CT2 على أنه جزءاً من المرحل؛ بحيث انه في المعادلة (11.3) يشير CT إلى محول تيار الخط الموضح في الشكل 11- 10 فقط .



الشكل 11- 17 المرحل المسافي المقارن.

بسبب وجود المقومات السيليكونية في الدائرة تكون قيمة ممانعة الثانوي كمية لا اتجاهية ويقوم المقارن بمقارنة الكميات المتشابهة، التيار على وجه التحديد، بحيث يغير خرج محول الفولتية VT إلى تيار يدعى بالتيار الكابح I_R بسبب وجود الممانعة Z_R التى تدعى بالممانعة الكابحة. ويزود محول التيار CT تيار التشغيل I_O وتمثل التيارات المقوَمَة (الموحدة الإتجاه) التيارات الدوارة للمنظومة؛ عليه يكون تيار المرحل هو الفرق العددي بين هذه التيارات، أما المرحل فيكون من النوع ذي المغناطيس الدائم متحرك الملف (كالذي يستخدم في مضخمات الصوت). إن تياراً أكبرمن تيار التنظيم يدخل عند الطرف الموجب سوف يتسبب في غلق نقاط تماس (ملامسات) المرحل ويبدأ باعتاق قاطع الدائرة عند A فقط (ولا يكون ذلك إلا عند الموضع A) لذا فإن خرج محول التيار CT يعمل على تشغيل المرحل بينما خرج محول الفولتية VT يعمل على كبحه. ولخط متجانس تتناسب Z_f وكذلك Z_m مع طول الخط من نقطة الترحيل Relaying point (نقطة تواجد المرحل) إلى نقطة العطل. على هذا الأساس يعين المرحل المسافي موقع العطل بالضبط. أما تيار التنظيم فهو تيار المرحل الذي يسبب قوة كافية للتغلب على فعل القصور الذاتي وفعل الأحتكاك وفعل نابض الإرجاع. وخلال عطل داخلي، يجب أن يكون تيار المرحل بقدر عدة أضعاف تيار التنظيم لضمان الاشتغال السريع.

إن مسافة انتقال ملامسات المرحل تكون صغيرة، عليه يكون الاشتغال لحظيا (60 ملي ثانية) والملف يكون ملفوفاً على قطعة مشكّلة من الالمنيوم ليهيء إخماداً للإهتزاز ضد تيارات التوافقيات أو القوى الخارجية. قد يظهر أن المرحل يمكنه التمييز بين الأعطال الخارجية والداخلية إلى المسافة AB وذلك بتنظيم مكونات الدائرة بحيث تكون تيارات التشغيل والكبح متساوية لعطل عند B وإذا ما تحركت نقطة العطل نحو بداية AB فان الممانعة Z_f سوف تنقص وكذلك تنقص الفولتية V، لكن تيار العطل I_f سيزداد فيقوم بتشتغيل المرحل. وبالإسلوب نفسه فإن عطلاً على الخط BC سوف يكبح المرحل ويمنعه من الإشتغال.

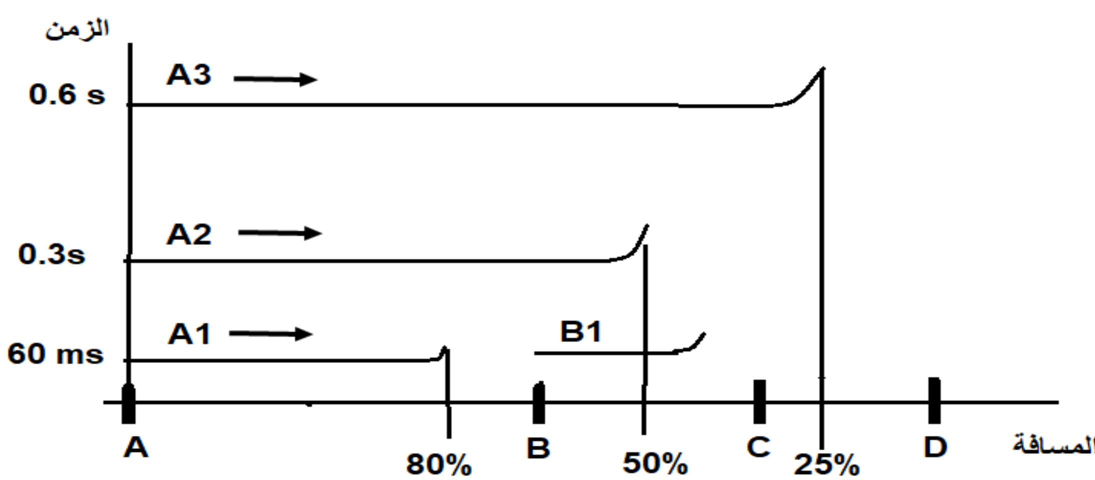
4-7-11 مفهوم وصول المرحل المسافي: تقسيم مناطق الحماية لخط نقل شعاعي

Reach of Distance Rely: Zones of Protection for Radial Line

يعرَف وصول المرحل بأنه هو المسافة التي يستطيع المرحل أن يصل إليها لكي يقوم بحماية الخط، وتقاس من نقطة التشغيل (الترحيل) إلى نقطة العطل. ويمكن أن تعطى بدلالة المسافة أو بدلالة

ممانعة الإبتدائي أو الثانوي، وتشير بصورة عامة إلى المرحل عند مستهل الإشتغال أي عند حد معايرته. وبسبب وجود السماحات والإختلافات في أجزاء الدائرة فانه لايمكن لدقة القياس أن تكون تامة، لذا فمن المعتاد أن يتم تنظيم المرحل لممانعة ثانوي مناظرة إلى 80% من ممانعة AB بذلك يطلق على مرحلة تشغيل المرحل هذه بالمرحلة الأولى للمرحل A (مُعلَم بالرمز A1 في الشكل 11-18، وتحل مسألة حماية لـ 20% الباقية من AB بتغير تنظيم المرحل حتى يصل إلى 50% داخل المنطقة BC وذلك بفتح ملامسات المؤقت الموضح في الشكل 11- 17، وبذلك تزداد المقاومة الكابحة Z_R (وقد تستخدم طرق أخرى غيرهذه في الحياة العملية) .

إن هذا يقلل من التيار الكابح ويعيد إلى المرحل توازنه ويجب تقليل تيار التشغيل، لذا يتم تقليل تيار العطل إذا مازادت Z_f ويطلق على المرحل هنا مرحل A المرحلة الثانية، ويعلم بالرمز A2 وينبغي أن يميزالمرحل A2 مع المرحل B لذلك فإن التغير من A1 الى A2 يتم تأخيره زمنيا بـمقدار 0.3 ثانية وذلك لكي تتم إزالة الأعطال في الـ 50% الأولى من BC بوساطة B في زمن مقداره 60 ملي ثانية زائداً زمن قاطع الدائرة في B (0.15 ثانية) زائداً حد أمان معقولا، وقد تمت مناقشة مديات زمن التميز في الفصل العاشر.

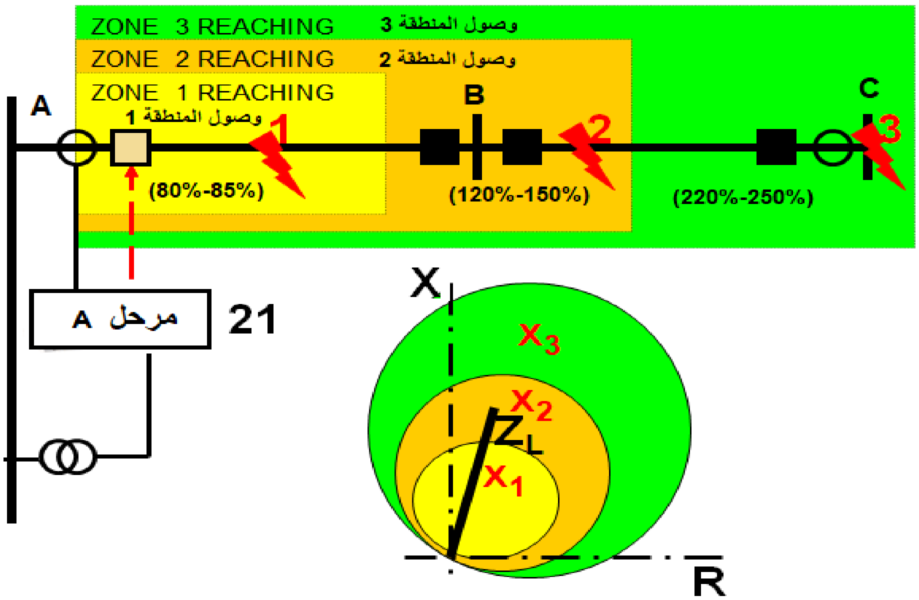


الشكل 11-18 مراحل تشغيل المرحل المسافي عند النقطة A.

على هذا الأساس فان منظومة الحماية المسافية لها عيب في كونها منظومة لاوحدية ذات تدرج زمني مع إزالة بطيئة للأعطال في المرحلة الثانية، لكنها تعطي فعلا إزالة لحظية إلى 60% من المنطقة على جهتي المنطقة نفسها. لذا تتفوق بصورة كبيرة على منظومة الزمن العكسي

(IDMTL) ذلك لأن الأزمنة تكون هي نفسها لكل منطقة وليست متراكمة باتجاه المصدر، ولأسباب اقتصادية، يستخدم عادة المرحل نفسه لكلتا المرحلتين (الأولى والثانية)، لذلك فان أي فشل في المرحلة الأولى يسبب فشلا ضمياً في المرحلة الثانية. ولإعطاء حماية ساندة تضاف منظومة حماية مسافية منفصلة تستطيع ان تصل الى 25% باتجاه CD وتدعى هذه بالمرحلة الثالثة وتؤخر بزمن مقداره 0.3 ثانية إضافي. ومنظومة المراحل الثلاث هذه تسمى المنظومة المسافية ثلاثية الخطوة (المتدرجة أو السلَمية). فاذا حصل عطل ما ضمن مدى وصول A3 فانه سوف يباشر بتشغيل مرحل توقيت. وإذا كان العطل ضمن الـ 80% الأولى من AB فإن A1 يجب أن يشتغل لحظياً ويقوم بفصل قاطع الدائرة عند A. وإذا كان هذا الإعتاق أو الفصل لايتم بعد 0.3 ثانية فان الموقت سوف يحول A1 إلى A2 وذلك بفتح الملامسات التي تكون في حالة غلق طبيعي في الشكل 11-17 وهذا يجب أن يزيل الأعطال في الـ 20% التي في النهاية (ويتم ذلك أيضاً في قاطع الدائرة A). أما إذا مرت 0.6 ثانية ولم يتم إزالة العطل خلالها فان الموقت سيفصل قاطع الدائرة عند A. وعلى القارئ أن يكمل هذه المناقشة لما تبقى من مدى وصول A3 بفرض أن هناك منظومات مسافية ثلاثية الخطوة موضوعة عند B وكذلك عند C. والنسب 50% و 80% وكذلك 25% المشار إليها يمكن تغيرها وعلى القارئ أن يجد مدى التغيير الخاضع إلى التحديدات المنصوص عليها بحيث لايمكن عنده فقدان التمييز، أي بدون أن تتداخل الخواص الزمنية. ويمكن أيضاً تغيير مقدار الحد الزمني المأخوذ وهو 0.3 ثانية (ليتوافق مع زمن قاطع الدائرة الكلي) ولكن لايجب أن يكون أقل من 0.25 ثانية.

قد تنصب المنظومات المسافية عند كلا طرفي المغذيات جميعاً بحيث يكون لكل مغذٍ منطقة محمية، وجميعها تشتغل ضمن مديات المناطق الخاصة بها: فتلك التي تصل مدياتها إلى اليمين يمكن توضيحها بالأزمنة الموجبة، أما تلك التي تصل إلى اليسار فتكون لها أزمنة " سالبة" والمبينة في الشكل11- 18. وتكون المنظومات المسافية من النوع اللاوحدية وذلك لكونها تقوم بتشغيل قواطع الدائرة المحلية الخاصة بها فقط. والمنظومة التي تمت مناقشتها في أعلاه هي لا إتجاهية، حيث إنها تجري العملية نفسها لتيارعطل معين سواء كان انسيابه من قضبان التوزيع أو اليها. وتسمى في هذه الحالة بمنظومة الممانعة البسيطة (Plain Impedance Rely). ويوضح الشكل 11-19 مناطق الوصول الثلاثة للمرحل A ومدياتها بالنسب المئوية من طول الخط. كذلك يوضح الشكل 11-20 أزمان الإشتغال النموذجية للمرحلين A و B للفائدة.



الشكل 11-19 مناطق الحماية ومدياتها القياسية لمرحل ممانعي في الطرف القريب من المصدر A.

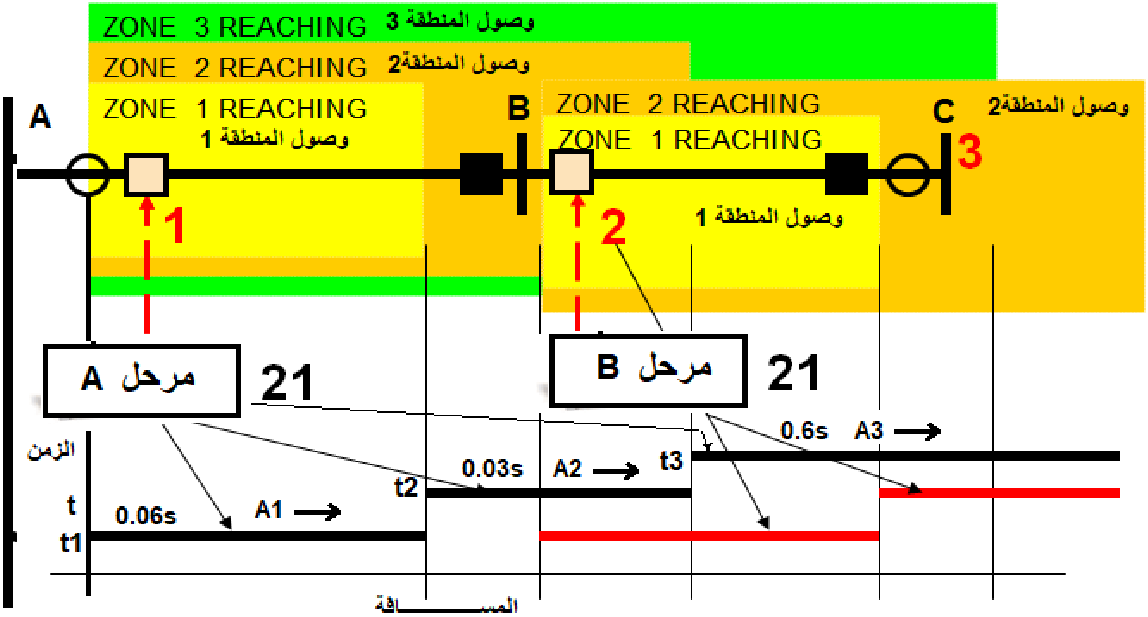
11-7-5 المرحلات المسامحية المستقطبة (مرحلات مهو)، والمرحلات المسامحية المنزاحة والمرحلات المفاعلية

POLARISED MHO , OFF-SET MHO AND REACTANCE RELAYS

يحدد منحنى الخواص لمرحل ما حافات الإشتغال له ويرسم هذا المنحنى عادة بوصفه محلاً هندسياً للنقطة (R, X) حيث تكون $Z = R + jX$ هي قيمة التنظيم لذلك المرحل، أنظر الشكل 11-20 . ويجب الإعتناء عند رسم هذا المنحنى لكي يكون واضحاً أي جانب من المسار سيعتق وأيهما سيستقر. وترسم ممانعة الخط المحمى على المحاور نفسها وتكون خطاً مستقيماً يميل بزاوية ممانعة الخط Φ على محور المقاومة R حيث

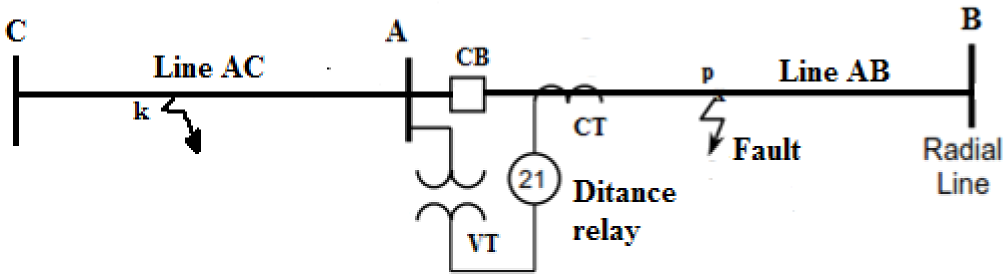
$$\frac{\text{مفاعلة الخط}}{\text{مقاومة الخط}} = \tan \Phi$$

أما المرحل الممانعي الخالص البسيط (بدون ملحقات) الذي تمت مناقشته فى الفقرة 11-6-2 فيكون لا اتجاهياً ويقيس مقدار ممانعة دارة العطل فقط (بغض النظر عن زاوية الطور). لذا تكون

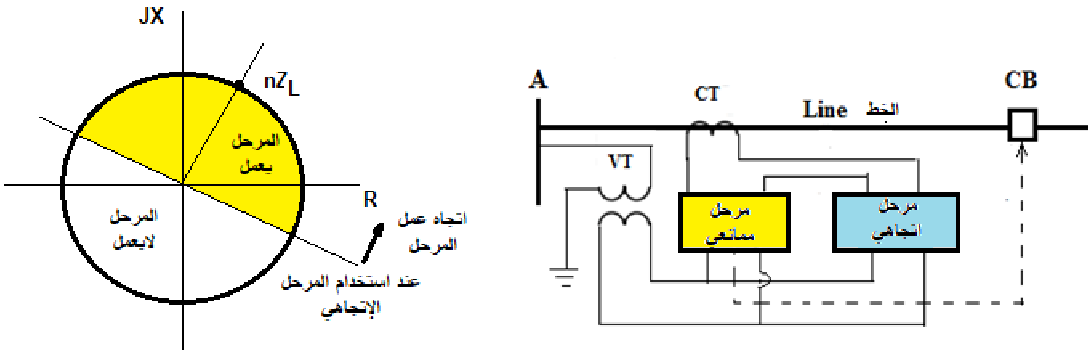


الشكل 11-20 مناطق الحماية ومدياتها القياسية والأزمنة النموجية للتشغيل للقاطعين A و B.

خواصه دائرة متمركزة في نقطة الأصل كما في الشكل 11-16. وبنصف قطرمساوٍ لتنظيمه. ويشتغل المرحل لأي ممانعة لدارة العطل (التي يتم اعتبارها نقطة) فى داخل الدائرة. أي أن المرحل الممانعي البسيط يكون غير اتجاهياً مطلقاً أي أنه يشتغل لجميع الأعطال على طول الإتجاه AB في الشكل 11-21 مثل النقطة p وكذلك جميع الأعطال خلف قضيب التوزيع A حتى قيمة الممانعة AC مثل النقطة k. ويمكن جعل المرحل اتجاهياً باضافة مرحل واطميتري، كما مبين في الشكل 11-22 ولكن مثل هذه المنظومات قد تم إبدالها بالمرحلات التي سناتي على ذكرها فيما يلي.



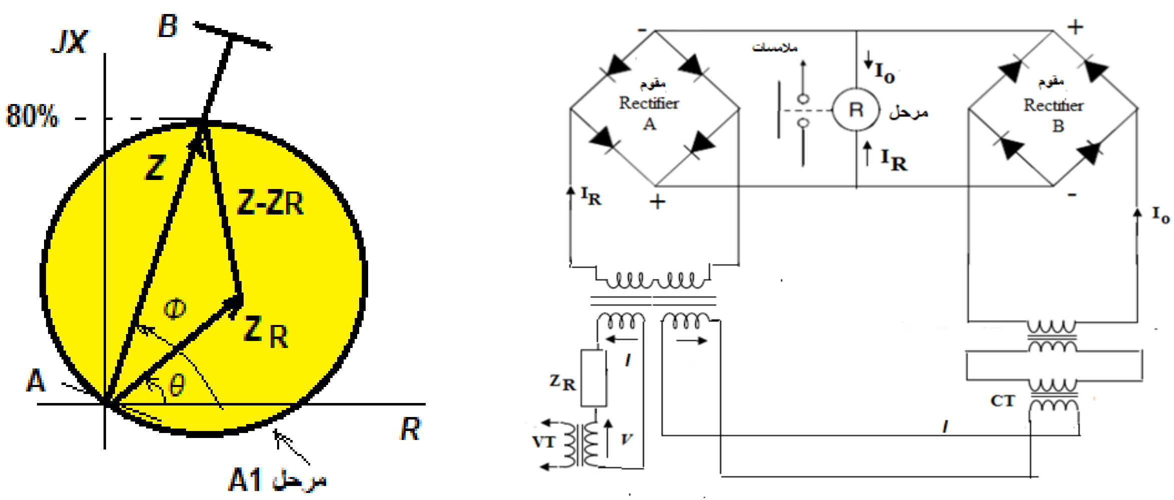
الشكل 11- 21 المرحل الممانعي البسيط يكون لا إتجاهياً ويتحسس للأعطال التي خلفه تماماً.



الشكل 11-22 مرحل ممانعي بسيط مساحة التشغيل داخل دائرة مع سيطرة اتجاهية لتحديد مسافة التشغيل إلى نصف الدائرة العلوي لجعله مرحل إتجاهي.

11-7-6 المرحل المسامحي المستقطب (MHO)

المرحل المسامحي هو مرحل يقيس المسامحة Y التي هي معكوس الممانعة Z. كذلك فهو يعد مرحل قياس مسافة ويكون إتجاهياً دوماً. أما الدائرة الخاصة به فمبينة في الشكل 11-23 (أ) حيث تم استخراجها من الشكل 11- 17 باضافة محولات مازجة بحيث أن التيارات التي تكون بدرجة من التناسب لفولتية وتيار خط النقل يمكن اضافتها طورياً



(ب) (أ)

الشكل 11- 23 مرحل مسامحي (مهو) :(أ) الدائرة الكهربائية ، (ب) خواص المرحل بدون دائرة الإستقطاب.

ويتم الحصول على مرحل مسامحي (مهو) (MHO) وذلك بطرح خرج التيار لمحول التيار CT من خرج محول الفولتية VT للحصول عل التيار الكابح الكلي . حيث أن المرحل سوف يشتغل عندما

$$|I| \geqq \left|\frac{V}{Z_R} - I\right|$$

$$|Z_R| \geqq \left|\frac{V}{I} - R\right|$$

$$|Z_R| \geqq |Z - Z_R| \qquad [11.9]$$

حيث $Z = V/I$ هى ممانعة العطل مقاسة بالأومات الثانوية (في جهة الثانوي). (ينبه القارئ هنا ليكون حذراً جداً عندما يتعامل مع المعادلات المتباينة وخاصة تلك التي تتضمن مطاورات). إن خواص المرحل هي دائرة تمر من خلال نقطة الأصل ويعطى مركزها بالنسبة إلى محور المقاومة R بالقيمة $Z_R = Z_R/\underline{\theta}$: حيث يطلق على θ الزاوية المميزة (أو زاوية العزم الاقصى) للمرحل، أما تنظيم المرحل (بالأومات الثانوية) فيعطى بواسطة القطر ($2Z_R$) للدائرة. لذا فان

$$\text{وصول المرحل} = \text{تنظيم المرحل} \times \cos(\Phi - \theta) \qquad (11.10)$$

ويشتغل المرحل لأية ممانعة عطل داخل الدائرة.

وإذا اخذ نا (11.9) كمعادلة فبالإمكان تحويلها إلى معادلة دائرة بالإحداثيات القطبية. وإذا كان العطل خلف المرحل عندئذ تنعكس قطبية تيار محول التيار CT بالنسبة إلى فولتية محول الفولتية VT وبذلك يزداد فعل الكبح بينما لايتغير فعل التشغيل ذاته، وعلى هذا الأساس يكون المرحل إتجاهياً دوماً. وعندما تكون $V = 0$ ، أي أن العطل قريب من نقطة المرحل (الترحيل) (عطل قريب جداً) فيصبح اشتغال المرحل غير مؤكد. (انظر (11.9))، لذا تحل هذه المسألة بإضافة فولتية إلى جهة الكبح تسمى بفولتية الإستقطاب والتي يتم الحصول عليها من زوج من الأطوار السليمة (أي الأطوارالسليمة الصحيحة غير المعرضة للعطل) ويطلق على المرحل الناتج بالمرحل المسامحي المستقطب Polarized mho relay . لكن كلمة " مستقطب " تحذف في معظم الأحيان لذا يقصد بالمرحل المسامحي في المجالات العملية عموماً بالمرحل المسامحي المستقطب.

إن طرق ربط وتحليل المرحل المسامحي المستقطب معروفة ويمكن الحصول عليها في المراجع الخاصة بكتب الحماية وأدلة الشركات الصانعة. وقد سميت المرحلات المسامحية بهذا الاسم

لأن خواصها هي خط مستقيم عندما ترسم على محاور (G, B) حيث Y= G - jB، بحيث أن المقلوب الهندسي للدائرة هو خط مستقيم. ومنذ ظهور نظام وحدات .S.I العالمية، تم إبدال كلمة المهو (mho) بالسيمنس كوحدة لقياس المسامحة كما هو معروف لدى القارئ.

الآن، إذا كان العطل عند محول الفولتية VT عطلاً ثلاثي الطور فلا توجد في هذه الحالة فولتية إستقطاب. ولحل هذه المسألة، هناك طريقة تتضمن إدخال متسعة توالٍ في دائرة الإستقطاب بحيث يتم توليف تلك الدائرة إلى تردد 50 هرتز مع جعل أطراف الإبتدائي لمحول الفولتية VT مقصورة الدائرة، ويدعى هذا الحل بتفعيل الذاكرة. أي أن الدائرة المتذبذبة تبقي على تيار الإستقطاب لعدة دورات بعد لحظة حدوث العطل وبذلك يتمكن المرحل من القياس بصورة صحيحة.

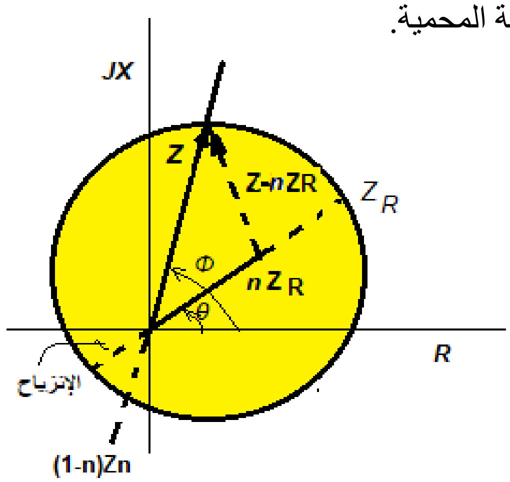
11-7-7 المرحل المسامحي المنزاح Off-set mho relay

هذا المرحل هو مرحل مسامحي (mho) كما مبين خواصه في الشكل 11-23 إلا أن جزء من تيار محول التيار CT الخارج وهو جزء كسري، أي قيمته أصغر من واحد (n < 1) يتم حقنه في دائرة الكبح، ويشتغل المرحل عندما يكون:

$$|I| \geqq \left|\frac{V}{Z_R} - nI\right|$$

$$|Z_R| \geqq |Z - nZ_R| \qquad [11.11]$$

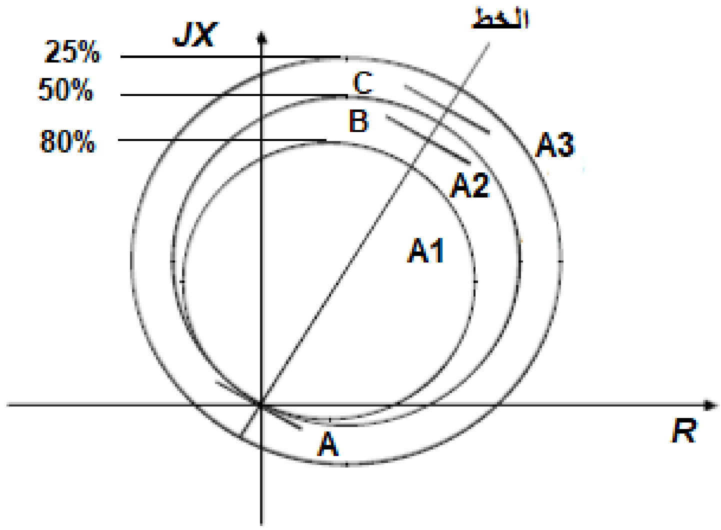
إن خواص المرحل مبينة في الشكل 11-23 حيث تقع مساحة التشغيل داخل الدائرة وتعطى الإزاحة بالعلاقة $(1-n)Z_R$. وهذا المرحل يعمل عندما يكون $V = 0$ ويعمل أيضاً لأعطال على مسافات قصيرة خلفه أي يعطي بعض الحماية الساندة (حماية احتياطية) لقضبان التوزيع، أما القيمة النموذجية لإعطاء الإنزياح فهي 10% من طول المنطقة المحمية.



الشكل11- 23 خواص المرحل المسامحي المنزاح (ذو الإزاحة).

11-7-8 منظومة حماية مسافية نموذجية لأعطال الطور والأرض

هذه المنظومة المتخصصة أيضا بالكشف عن أعطال الأرض مبينة في الشكل 11- 24 حيث أن المرحلة 1 تكون مرحل قياس مسافة بواسطة مرحل مهو (مستقطب) منظم لحوالي 80% من طول الخط المحمي AB . ويتبدل بعد مرور حوالي 0.3 ثانية ليكون مرحل المرحلة 2 عندما يتجاوز تنظيمه حوالي $1\frac{1}{2}$ المنطقة المحمية. ومرحل المرحلة 3 الذي يكون مرحلاً ثلاثي القطب ومنفصلاً بصورة تامة وهو مرحل مسامحي منزاح منظم ليصل إلى حوالي مرتين وربع أكثر من المسافة المطلوبة؛ وهذا يبدأ بتشغيل مرحلي توقيت لعطل ضمن مدى وصوله. ويبدل مرحل التوقيت الأول قياس المرحلة 1 إلى المرحلة 2 بحوالي 0.3 ثانية بينما يقوم الثاني بإعتاق قاطع الدائرة عند A بحوالي 0.6 ثانية بعد لحظة حدوث العطل (إذا لم يتم إزالة العطل في هذه الفترة) وتبين علامات تأشيرالأعطال المستخدمة في المرحلات نوع العطل ومنطقة وقوعه ليستدل بها الأشخاص العاملون على صيانة الخط.



الشكل 11-24 مرحل مسامحي ذي ثلاثة مناطق.

مثال محلول 11-1

خط ذو فولتية 132 كيلو فولت يتكون من مقطعين، الأول AB بطول 96.5 كم والثاني BC بطول 64 كم. والممانعة $Z_1 = 0.435\angle 70^\circ$ أوم / طور - كم. وأدنى ميكا فولت أمبير للمصدر (مستوى عطل ثلاثي الطور) عند A هو 1500 MVA (باهمال المقاومة). نسبة محول الفولتية

VT هي 132 000/110 فولت، أما نسبة محول التيارCT فهي 600/1 أمبير. زاوية التمييز للمرحل هي °60. إحسب التنظيم لمرحل مسامحي مستقطب مثبت عند A الذي سوف يعطي وصولاً للمرحلة 1 مقداره 80% من AB . أفرض عطلاً ثلاثي الطور.

الحل :

$$132^2/1\,500 \;=\; \frac{132/\sqrt{3}}{1500/(\sqrt{3}\times 132)} =$$ المفاعلة القصوى للمصدر

$$= \;11.62$$ أوم ابتدائي/طور

$$33.6\angle 70^{\circ} = 0.8\times 0.435\times 96.5\angle 70^{\circ} =$$ وصول المرحلة 1

$$11.48 + j43.22 \quad =$$ ممانعة العطل الكلية

$$44.6\angle 71.18^{\circ} \;=$$ أوم ابتدائي لكل/طور

$$1.71 \;=\; (132/\sqrt{3})/44.6 \quad =$$ تيار العطل الادنى = ... كيلو أمبير ابتدائي

أو $1710/600 \;=\; 2.852$ أمبير ثانوي فولتية الخط عند نقطة المرحل (الترحيل)

$$= 33.6\times 1.71\times\sqrt{3} = 99.2$$ كيلو فولت ابتدائي (خط)

$$= 99.2/(132/110) = 82.7$$ فولت ثانوي (خط)

وصول المرحل المعوض $= (82.7/\sqrt{3}\times 2.852) = 16.8$ أوم ثانوي / طور

ويمكن الحصول على هذه النتيجة بالتعويض في (11.3)

الوصول $= 33.6\times\frac{600/1}{132000/110} = 16.8$ أوم ثانوي / طور

تنظيم المرحل للمرحلة 1 $= 16.8/\cos(70-60^{\circ}) = 17.0$ أوم

(والتنظيمات النموذجية المتيسرة هى من 3 إلى 20 أوم)

8-11 مقاومة القوس الكهربائي

إذا حدث شرر عرضي من طور إلى طور في خط (أو طور إلى البرج (الأرض)) فإن مقاومة القوس الكهربائي يمكن أن تكون لها قيمة ملموسة خاصة لخطوط الفولتية العالية المتباعدة بصورة كبيرة وكذلك للأعطال غير المزالة في المرحلة 1. إن مقاومة القوس هذه تضاف إلى ممانعة الخط حتى نقطة العطل لتنتج الممانعة المقاسة بواسطة المرحل. هذا التأثيريمكن تقليله إلى الحد الأدنى باختيار مرحل له زاوية تمييز (θ) تكون أقل من زاوية الممانعة للخط (Φ). وتعطي بعض الكتب المرجعية قيما للزاوية θ وعلاقتها بفولتية المنظومة وكالاتي:

فولتية المنظومة (بالكيلو فولت)	400	275	132	66	33	11
الزاوية θ	75	75	60	60	45	45

كما تعطي بعض المراجع المعادلة التالية لحساب المقاومة التقريبية للقوس الكهربائي:

$$R = 16000(1.75\,S + vt)I^{1.4} \text{ أوم}$$

حيث :

S = مسافة الفصل بين الموصلات بالمتر

v = سرعة الريح . كم / ساعة

t = الزمن , ثانية

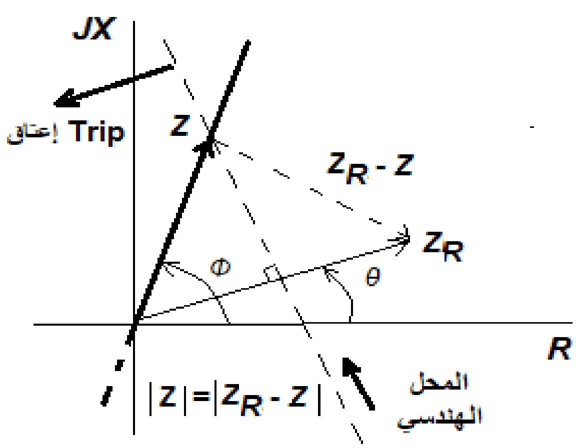
9-11 المرحل المفاعلي Reactance relay

تكون ممانعة دارة العطل الأرضي دالة لمقاومة قوس العطل وكذلك دالةّ لمسار العودة الأرضي، وكلاهما قد يكون متغيراً وليس ثابتاً أو محدوداً. وهذا يؤثر على الممانعمة المقاسة بواسطة المرحل وبذلك يؤثر على تحديد موقع العطل. إن الطريقة المثلى التي يتم بها التغلب فيها على مثل هذه المشكلة تكون بقياس مفاعلة دائرة العطل نفسها باستخدام مرحل مفاعلي Reactance relay. في هذا المرحل، والذي يسمى أيضاً بالمرحل الأومي، تتم تغذية دائرة الكبح من خرج محول الفولتية VT بينما يتم تجهيز دائرة التشغيل بواسطة فرق الطور بين خرج محول التيار CT وخرج محول الفولتية VT. لذا فإن المرحل الأولي الذي يشتغل أولاً سوف يشتغل عندما يكون:

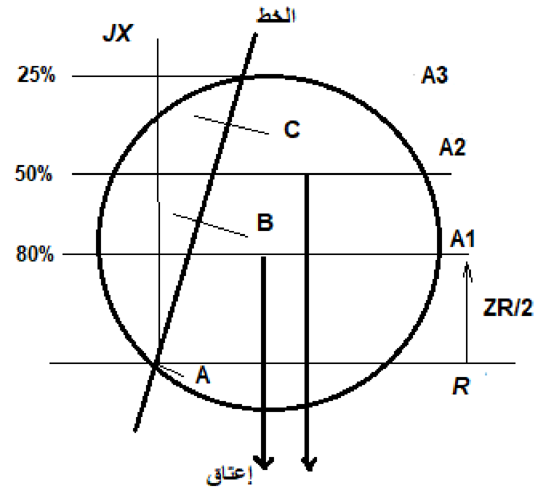
$$\left|I - \frac{V}{Z_R}\right| \geqq \left|\frac{V}{Z_R}\right|$$

$$|Z_R - Z| \geqq |Z| \qquad [11.12]$$

ويوضح الشكل 11-25 خواص المرحل الأومي: وهي العمود المنصف لممانعة الكبح $Z_R = Z_R/\underline{\theta}$ (الحثية). يمكن إختيار ميل الخواص وذلك باختيار الزاوية θ ويتم إعتاق المرحل عندما تقع الممانعة المقاسة إلى يسار الخواص. وتستخدم المرحلات الأومية أحياناً كمرحلات مقيدة تقوم بمنع قاطع الدائرة من الفصل وذلك بفتح الملامسات في دائرة إعتاق قاطع الدائرة التي تكون مغلقة في الحالة الطبيعية NC في المرحل المفاعلي. وتكون الممانعة الكابحة هي محاثة بحتة ($\theta = 90°$). لكن المثالية هذه لايمكن الحصول عليها في الحياة العملية، لذا فانه من الضروري إستخدام دوائر يكون الطورفيها متغيراً، وتكون الخواص فيها عبارة عن خط مستقيم أفقي كما موضح في الشكل 11-26. ويفصل المرحل عندما تقع الممانعة المقاسة أسفل الخواص شاملة جميع مافي الربعين الثالث والرابع. لذا يكون المرحل المفاعلي لا إتجاهياً في هذه الحالة. وعندما يكون خط النقل المحمي قصيراً فإن المرحل المفاعلي يكون متمكناً كمرحل قياس مسافة لعطل الأرض. ويعود ذلك إلى كون أن أية مقاومة للقوس الكهربائي مهما تكن متغيرة يمكن أن تشكل جزء لايمكن إهماله من ممانعة الدائرة.



الشكل 11-25 المرحل الأومي (المقاومي).



الشكل 11-26 تخطيط عطل أرضي نموذجي.

10-11 نظام حماية مسافي للكشف عن عطل الأرض

يبين الشكل 11- 26 نظاماً يمكن تطبيقه لحماية خط نقل من عطل الأرض باستخدام المرحل المسافي؛ حيث تحتوي فيه المرحلة 1 والمرحلة 2 على مرحلات مفاعلية Reactance relays. إن هذه المرحلات تكون لا إتجاهية ومعرضة إلى إعتاق القواطع لأعطال خلف نقطة التشغيل ومن المحتمل أيضا أن تشتغل حتى لتيار حمل يسري من الخط المحمي AB إلى قضبان التوزيع عند A، لذلك فان المرحل المسامحى البادىء (A3) يكون ضرورياً. وليست المسألة وضع مجموعتين من الملامسات للمرحلات على التوالى: إن ملامسات المرحل البادىء تكون مغلقة بالوضع الطبيعي وبذلك فهي تقصى دائرة خرج محول التيار CT المساعد رابطة إياه مع المرحل المفاعلي. لذلك فان مرحل قياس المفاعلة لا يمكنه البدء في القياس حتى يتاكد المرحل البادىء من أن العطل يكون أمام المرحل نفسه.

وفي معظم بلدان العالم تزود كافة خطوط الشبكة الكبرى بسلك أرضي معلق في الهواء وهذا بدوره يقلل مقاومة مسار العودة الأرضي ويجعلها أكثر استقراراً. كذلك فان المرحلات المفاعلية تكون معرضة لعدم الدقة في القياس عندما يمتلك القوس الكهربائي الناشئ عن عطل الأرض مقاومة ملموسة وكذلك وجود تغذية للعطل من كلا جانبي الخط. وتظهر ممانعة القوس بكونها حاوية على مركبة متفاعلة Reactive كما تقاس بواسطة المرحل المفاعلي بحيث أن المرحل لأحد الجهات من الخط قد يتجاوز وصوله Over-reach بينما يكون المرحل في الطرف الآخر ناقص الوصول

Under- reach، لهذه الأسباب يتم استخدام المرحلات المسامحية بدلا من المرحلات المفاعلية حتى للخطوط القصيرة لأن الأولى لها دقة قياس أفضل.

11-11 تعجيل زمن المرحلة 2 ACCELERATION OF STAGE 2 TIME

إن من المساوىء الكبرى للمنظومة المسافية هو بطء المرحلة 2 في إزالة عطل في النهاية البعيدة 30% من المنطقة المحمية AB. وللخطوط المهمة ذات الفولتية العالية جداً فإن مثل هذا الزمن الطويل لإزالة العطل لايمكن تحمله وذلك بسبب خطر العطب الذي يحدثه العطل وإمكانية فقدان استقرارية المنظومة. على كل حال، فأن مثل هذا العطل يكون ضمن وصول مرحل المرحلة 1 عند B (الذي يحمي النهاية الأخرى من الخط AB) والذي يعتق قاطع الدائرة عند B. كذلك يبدأ بارسال الإشارة إلى النهاية A مستخدما سلكاً مرشداً هاتفياً؛ أو أجهزة ذات موجة محملة عالية التردد، أو وصيل اتصال راديوي. هذه المنظومات الثلاث المتباينة تكون الأجهزة الأساسية فيها هي المنظومة المسافية ذات التدرج الثلاثي والتي تمت مناقشتها سلفا؛ وفي حالة غياب أو فشل قناة إرسال الإشارة فان كلاً منها سوف تعطي حدود تمييز الزمن الطبيعية بين المراحل الثلاث.

12-11 منظومة مسافية معجلة

في هذه المنظومة تقوم الإشارة بإعتاق قاطع الدائرة عند A وهذا يحدث فقط إذا شتغل مرحل المرحلة B عند A أولاً (أو المرحلة 2 إذا كان ذلك مرحلاً منفصلاً)، لذا فالحماية عند A يجب أن تشتغل في زمن المرحلة 1 من B (60 ملي ثانية) زائدا زمن مرحل الإشارة. وزمن مرحل الاشارة وزمن الإرسال يبلغ حوالي 70 ملي ثانية. وليس هناك حاجة لأن تكون قناة الإشارة ذات رصانة عالية صناعياً، ذلك لأن أي تداخل في القناة لايمكن أن يسبب الإعتاق للقاطع إلا إذا كان هناك عطل على المنظومة في ذات الوقت.

13-11 المنظومة المسافية ذات الإعتاق البيني Intertripped distance system

يقال عن قاطعي دائرة إنهما ذوا إعتاق أو فصل بينى إذا تسبب إعتاق أحدهما إعتاقاً للآخر. وفي المنظومة المسافية ذات الإعتاق البيني فإن إشارة آتية من B تعتق قاطع الدائرة عند A بدون الرجوع أولاً إلى الحماية عند A. لذلك فان قناة الإشارة يجب أن تمتلك رصانة عالية وتكون كلفتها عادة أكثر من القناة المستخدمة في منظومة المسافية المعجلة بسبب التحوطات التي يجب أن تتخذ

لمنع الإعتاق الكاذب نتيجة التداخل في قناة الإتصال. وفي حالة استخدام القناة ذات الموجة الحاملة يكون سبب التداخل بصورة رئيسية من الاشعاع الكهرومغناطيسي (الضوضاء) الناتج عن الشرارات الكهربائية في قواطع الدائرة المجاورة والفواصل وفجوات الشرارة عند اشتغال هذه الأجهزة. وأحد عيوب الإعتاق البيني ذي الإشارة الحاملة هو أن الإشارة يجب أن ترسل خلال العطل عندما يكون العطل قريباً من نهاية الخط حيث يمكن البرهنة على أن تضاؤل الإشارة يكون بأقصى قيمته عندها. إن زمن الإعتاق البيني ذي السرعة العالية يبلغ حوالي 25 ملي ثانية.

14-11 المنظومة المسافية المتواشجة (المقيدة)

Interlocked (blocked) distance system

يمكن عد أو اعتبار هذه المنظومة من المنظومة السابقة التي تم استعراضها سلفاً وذلك لأن الإشارة الخارجة الآن من B تمنع (تقيد) قاطع الدائرة عند A عن الإنعتاق ومرحل المرحلة 2 عند B يكون منظماً لمدى حوالي $1\frac{1}{2}$ من المناطق (أي AB زائداً حوالي نصف BC) ولكنه الأن يستطيع أن يعتق قاطع الدائرة عند A لحظياً على أن لاتكون الإشارة المقيدة قد تم استلامها بعد. لذلك يتم إعتاق قاطعي الدائرة عند A و B لحظياً لأي عطل مهما كان موقعه في المنطقة AB. عليه تكون المنظومة ظاهرياً هي منظومة حماية وحدة ، ولمنع قاطع الدائرة عند A من الفصل لعطل ضمن النصف الأول من المنطقة BC يبادر مرحل باديء عند B وضمن المنطقة BC باعطاء إشارة تقييد تفتح بدورها ملامسات تكون مقفلة في حالتها الطبيعية في دائرة إعتاق قاطع الدائرة عند A (أو في أي مكان آخر) وهذا الباديء الذي يبدأ أيضا بتشغيل مرحلات التوقيت يكون عادة مرحل ممانعي خالص (بسيط) وله تنظيم مقداره حوالي 225% وليس من الضروري أن يكون هذا المرحل دقيقاً جداً أو محصناً من تجاوز الوصول لكنه يجب أن يكون سريعاً جداً (1 ملي ثانية) .أما ميزة المنظومة المتواشجة فهي انتقال الإشارة الحاملة على الخط الصحيح AB عند حدوث أعطال خارجية على AB .وأما التداخل في أسوء الأحوال فلا يؤدي إلا إلى تأخير التشغيل لأعطال داخلية بزمن لا يتعدى زمن المرحلة الاعتيادي وذلك لكون أن مؤقتات المرحلة تتجاوز ملامسات المرحل المقيد (الحابس). وتشتمل المنظومة أيضاً على مرحل المرحلة 1، وهو مرحل لحظي اعتيادي منظم لحوالي 70% من AB (لمنظومة حلقية ثنائية الدائرة) ولايعتمد عمله على أية إشارة مقيدة لذلك فهو لايعتمد على التداخل ويمكن استخدام الإشارة المقيدة للخطوط الأقصر طولاً وكذلك عندما تكون المحولات

مربوطة إلى الخط مباشرة (أي بدون وجود أي قواطع دائرة مسيطرة). في هذه الحالة الأخيرة يسبب عطل في محول ما إعتاق قاطعي الدائرة عند A وB بصورة لحظية وبذلك يفتح فاصل يعمل بمحرك كهربائي عند محول التغذية ودوائر إعادة الإغلاق الذاتية المؤخرة ويعيد غلق قاطعي الدائرة عند A و B.

15-11 المنظومات المسافية المُأقْلَدَة (ذات الفتح والغلق)

SWITCHING-DISTANCE SYSTEMS

قد تشتمل المنظومة المسافية المتكاملة عند كلا طرفي خط على مرحل عطل أرض أو مرحل عطل طور لكل من الأطوار الثلاثة وثلاثة أمثال هذه تكون للمراحل الثلاث بحيث يبلغ مجموع المرحلات الكلي لكل نهاية هو18 (زائداً مرحلي توقيت واحد للمرحلة 2 والآخر للمرحلة 3 زائدا مرحلات مساعدة ودائرة تيارمستمر d.c.). هذه الكلفة لا تسوغ إلا إذا كان الخط مهم ذي فولتية عالية. أما الترتيب الشائع والذي يستخدم لفولتية 132 كيلو فولت فأعلى فيجمع المرحلتين1 و2 وبذلك يقلل عدد مرحلات المسافية إلى 12 لكل نهاية. ولجعل المنظومة المسافية اقتصادية لفولتيات 33، 66 كيلوفولت أوحتى لـخطوط 11 كيلو فولت فتتيسرهناك منظومات مسافية مأقلدة يتم فيها أستخدام مرحل مسامحى واحد للقياس فقط. أما طبيعة العطل فتحددها مرحلات التيار ألفوقي (المفرط) من نوع المنتج المنجذب البادئة، حيث توضع في الأطوار الثلاثة وتسلط الفولتية والتيار المناسبين على المرحل المسامحي مع زيادة طفيفة فقط في زمن المرحل الكلي. وقد تظهر بعض التعقيدات في امكانية تغير آني لنوع العطل قبل القيام بإزالته، لذلك يتطلب أن تكون ذروة تيار الحمل أقل من القيمة الدنيا لتيارالعطل.

16-11 قواطع الدائرة ذات إعادة الغلق الذاتي Auto-reclosing breakers

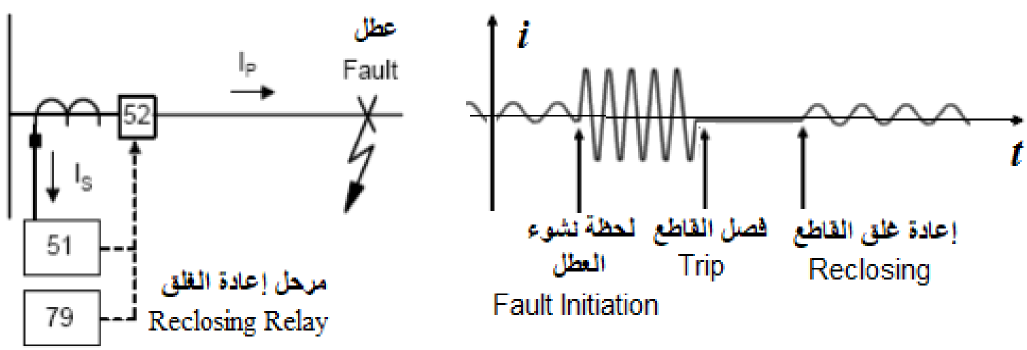
لوحظ من الدراسات الإحصائية أن 90% من الأعطال التي تحدث على خطوط نقل الطاقة الكهربائية تكون وقتية أوعابرة في طبيعتها وتزال في فترة صغيرة جداً لكنها تسبب فصل قواطع الدائرة التي تحمي الخطوط الرئيسية وتقطع التغذية عن مجموعة معينة من المستهلكين. ومثال على هذه الأعطال العابرة ناجمة عن الشرر العرضي الناتج عن الصواعق أو من الطيور المهاجرة الكبيرة التي تقف على الأسلاك وبعدها تحاول الطيران وتفرد جناحيها بحيث توصل بين طورين وتحدث قصر دائرة لكنها تصعق وتسقط على الأرض بعد أن تحدث عطل قصر. وكذلك الأسلاك

والقطع المعدنية المقطعة التي يتم رميها على الخطوط الناقلة للطاقة من قبل أشخاص مخربين أو تحملها الرياح لتستقر بين طور واحد مع جسم البرج المؤرض أو بين طورين اثنين. أي أن العطل يكون غير موجود بعد اختفاء تأين الهواء أو سقوط الأجسام والأسلاك المقطعة بعد وقت قصير.

في الوقت الحاضر، تم ظهورإنتاج قواطع دائرة تعيد عملية الغلق ذاتياً (الغالقات الذاتية) لتزيد من أمنية واستمرارية التجهيز وتقلل من الانقطاعات وبالتالي إلى تحسين استقرارية الشبكة. هذه القواطع الذاتية الغلق عبارة عن قاطع دائرة ثلاثي الطور يوضع في بداية الخط ويمكن أن يبرمج ميكانيكياً ليعطي إلى حد أربع عمليات إعتاق إما لحظية أو متاخرة زمنياً أوكليهما ليلائم منظومة القدرة. على أية حال، هناك عدة أنواع متوفرة في الحياة العملية للغلق الذاتي أو التلقائي اعتماداً على أهمية الخط ومقدار الطاقة التي يحملها، هذه الأنواع هي:

1) إعادة الغلق التلقائي ذي الدورة المفردة Automatic Reclosing – Single Cycle

في هذا النوع من الإغلاق التلقائي يعيد القاطع إغلاق الخط ذاتياً بنجاح بعد زوال تأثير العطل وإعطاء وقت كاف لضمور القوس الكهربائي الناتج عن العطل داخل القاطع نفسه. وهو أبسط أنواع الغلق الداتي ويستعمل للخطوط القصيرة المحملة بأحمال خفيفة. أنظر الشكل 11-27.



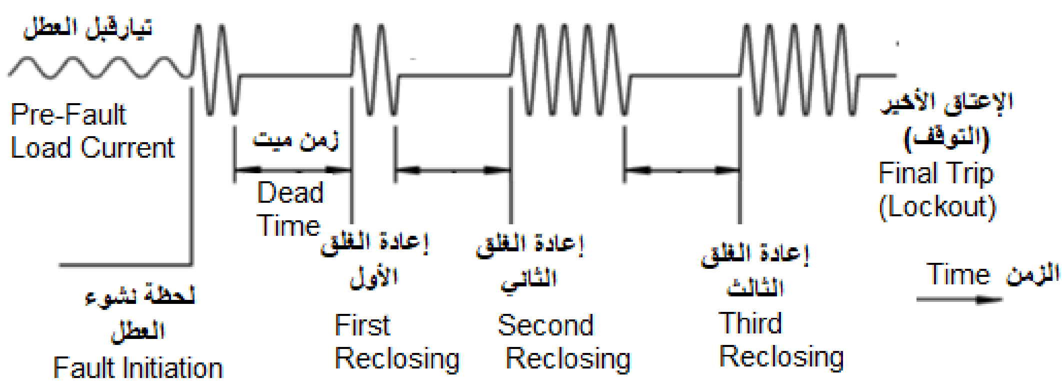
الشكل 11-27 إعادة الغلق التلقائي بدورة مفردة (إطلاقة واحدة).

إن مستوى العطل على الشبكة الكبرى يكون من الكبر بحيث أن الأضرار التي يسببها تكون جسيمة حتى ولو بنبضة واحدة من تيار العطل. لذا فقد أستُخدِمَت (وتستخدم) إعادة غلق بإطلاقه واحدة في تلك الآونة. وإذا تم فتح شبكة كبرى محملة فإن منطقة طرف الإرسال يصبح لديها فائض من القدرة لذلك فأنها تتسارع، بينما يحدث تباطؤ في منطقة طرف الاستلام وبذلك تزداد زاوية الطور بين فولتية طرف الإرسال وفولتية طرف الإستلام وقد ينتج تمور(هيجان) في التيار إذا ما تم إقفال

قاطع الدائرة. أما الزمن الأقصى الذي يمكن أن يبقى فيه خط الشبكة الكبرى مفتوحاً (زمن إعادة ربط الدائرة) فيكون حوالي 0.5 ثانية بينما يكون الزمن الأدنى للتخلص الأيوني لقوس العطل (الزمن الميت) حوالي 0.3 ثانية. إن الغوالق الذاتية يمكن إستخدامها فقط مع منظومات حماية الوحدة ذات السرعة العالية وذلك لأن قواطع الدائرة في كلتا نهايتي الشكبة الكبرى يجب أن تفتح بصورة لحظية.

2) إعادة الغلق التلقائي متعدد الدورات Automatic Reclosing: Multiple Cycles

في بعض الأحيان يتطلب إزالة العطل بصورة كلية أكثر من إعادة الغلق التلقائي لدورة مفردة أو إطلاقة واحدة. لذلك يتم ضبط المرحلات الغالقة لتنتج أكثرمن أمر أعادة غلق حيث يمكنها انتاج نحو ثلاثة أو أربعة أوامر غلق. ويتم أيضاً تنظيم الأزمان الميتة (الفترة التي يكون فيها القاطع مفتوح). هذه العملية تدعى بإعادة الغلق الذاتي متعدد الدورات المبينة في الشكل 11-28.



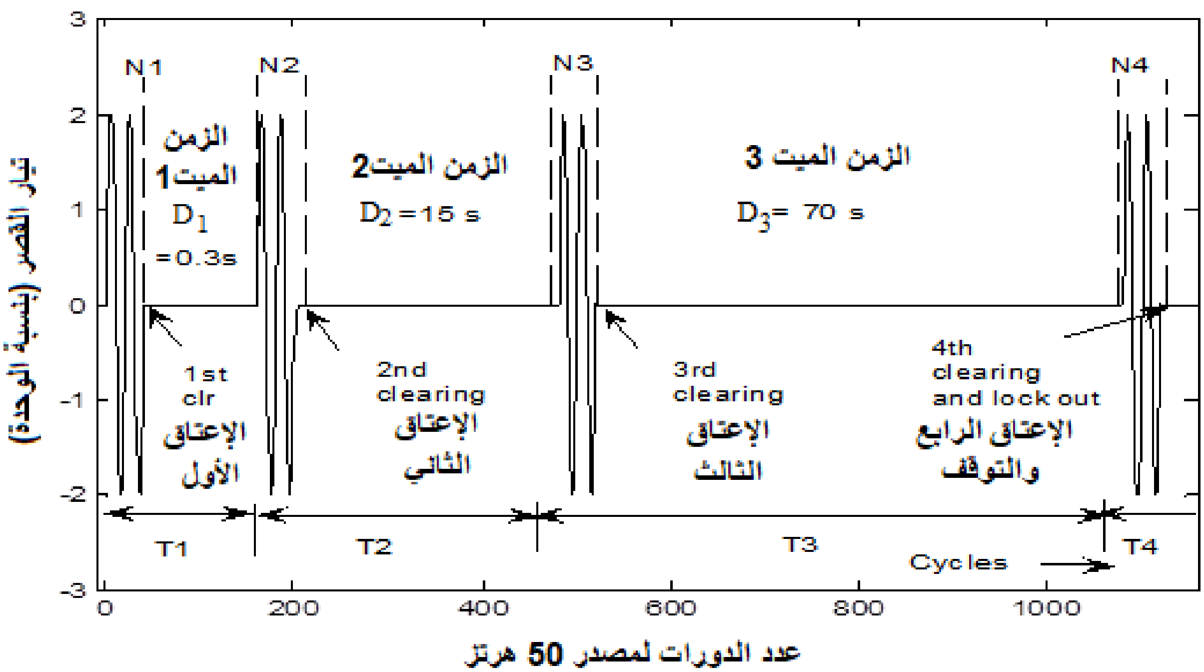
الشكل 11-29 إعادة الغلق التلقائي متعدد الدورات أو الإطلاقات.

11-16-1 تصنيف وتحديد الزمن الميت للغلق التلقائي

يصنف الغلق التلقائي عموماً إلى نوعين، الأول هو الغلق ذو السرعة العالية والثاني هو الغلق المتأخر أو البطيء. بالنسبة للدراسات والبحوث المعتمدة في هذا المجال فتشير إلى أن الزمن الميت لخطوط 400-500 كيلوفولت التي تستخدم نظام الغلق ذي السرعة العالية فيكون أقل من ثانية واحدة. ولخطوط 132 كيلو فولت وكذلك خطوط 150 كيلو فولت يؤخذ زمن ميت حوالي 0.3 ثانية. وبخصوص الزمن الميت هذا لأجهزة الغلق ذات السرعة العالية فان جميع مؤسسات الخدمة لنقل وتوزيع الطاقة يجب أن تأخذ بعين الإعتبار زمن إزالة التأين في القواطع لتحديد مقدار الزمن الميت المذكور. ويؤخذ بالدرجة الثانية عاملي تشغيل الخدمة للقاطع واستقرارية الشبكة نفسها.

11-16-2 التوصيات باستخدام أزمان الغلق والفصل لغالق تلقائي لخطوط النقل

إشارة الى الشكل 11-30 الذي يبين غالقاً ذاتياً يحمل تيار إعتيادي، فعند حدوث عطل يتحسس الغالق لتيار زائد (فوقي) ويفصل الدائرة لحظياً أو بعد زمن تأخير معين (N_1 عدد من الدورات) وبعد فترة زمنية (عادة تكون 0.3 ثانية (15 دورة)) يعيد الغالق لعدد N_2 من الدورات، فإذا كان العطل موجود ولم يزال يفصل الغالق مرة آخرى وينتظر لفترة زمنية ثانية مبرمجة مسبقاً (تكون عادة 15 ثانية أو 750 دورة). يستمر الغالق لفترة صغيرة مفتوح ويغلق مرة أخرى لعدد N_3 من الدورات ويفصل فقط في حالة إذا كان العطل باقٍ أو مستمر. وبعد فترة زمنية ثالثة (عادة تكون 70 ثانية أو 3500 دورة) يغلق الغالق نفسه للمرة الأخيرة. وإذا كان العطل لا زال باقياً يفصل الغالق بعد N_4 عدد من الدورات ويتوقف عن العمل وبعدها يحتاج إلى ضبط يدوي مرة أخرى. أما أذا تمت عملية الغلق التلقائي بنجاح فإن الدورة بأكملها تتم باعادة ضبطها ذاتياً ويتطلب ذلك من 30 إلى 240 ثانية.



الشكل 11-30 التوصية باستخدام أزمان الغلق والفصل لغالق تلقائي لخطوط النقل.

17-11 منظومات القدرة الريفية RURAL POWER SYSTEM

تشتمل منظومة توزيع ريفية نموذجية على خط علوي معلق شعاعي (تغدية احادية) ذي 11كيلوفولت بتفرعات خارجة مربوطة مع الخط على شكل T خطوط ناتئة (مهمازة) وتغطي هذه المنظومة مساحة كبيرة تكون معظمها بعيدة عن طرق المرور. وتكون الخطوط مثبتة على اعمدة خشبية عازلة أو أعمدة أسمنتية أو أعمدة حديد بحيث يكون احتمال وقوع الأعطال الأرضية بعيداً إلا في حالة انقطاع الموصل وسقوطه على الأرض. وفي منظومات الحماية القديمة، كانت توضع مصاهر عند الدخول الى الخط الرئيسي وكذلك الدخول إلى الخطوط الناتئة مشكلة بذلك منظومة حماية متدرجة الزمن. المشكلة العملية التي برزت انذ اك هي ان 90% من الاعطال تكون أعطالا عابرة نتيجة للشرر العرضي الناتج عن الصواعق وكذلك الأسلاك المقطعة التي يتم رميها عبر الاطوار. أي ان العطل غير موجود بعد اختفاء تأين الهواء ؛ لكن عملية استبدال المصاهركانت غير رخيصة ومستهلكة للوقت . خاصة بعد هبوب عاصفة رعدية شديدة.

لهذا السبب فقد تم في ذلك الوقت استخدام قواطع دائرة ذاتية الغلق قبل استخدامها في الشبكة الكبرى لتزيد من أمنية التجهيز وتقلل من الانقطاعات. والقواطع ذاتية الغلق التي استخدمت في المنظومات الريفية هي عبارة عن قاطع دائرة زيتي صغير ثلاثي الطور يوضع أسفل الخط وعلى العمود الخشبي أو الكونكريتي. ويمكن أن يبرمج ميكانيكيا ليعطي إلى حد أربع عمليات إعتاق إما لحظية أو متاخرة زمنيا أوكليهما ليلائم منظومة القدرة. ويتم الحصول على الطاقة الضرورية لنوابض الفتح والغلق من خط القدرة نفسه بواسطة مغاطيس كهربائى مربوط على التوازي خلال نقاط تلامس ثانوية عبر مصدر التغذية. عندما يفتح الغالق الذاتي (يفصل) تصل الطاقة إلى المغناطيس الكهربائي ويشحن ملفه نابض الغلق بصورة جزئية إلى نقطة بحيث يستطيع أن يفتح عندها الملف نقاط التلامس الثانوية في دائرة المغناطيس الكهرباني. ويرجع الملف إلى وضعه الطبيعي وتتكرر العملية إلى أن يتم شحن النابض بصورة تامة. وعند هذه النقطة يقوم النابض باغلاق الغالق الذاتي. هذا الفعل بدوره يفتح نقاط التلامس الثانوية.

أما حماية عطل الطور (التيارالفوقي أو المفرط) فتتم بوساطة ثلاث ملفات إعتاق مربوطة على التوالي تحمل تيارات الخط. ويقوم أي ملف من هذه الملفات بتزويد الطاقة اللازمة لتشغيل الغالق الذاتي (للأطوار الثلاثة) عندما يتجاوز تيار الخط قيمة التنظيم (أي حوالي ضعف التيار

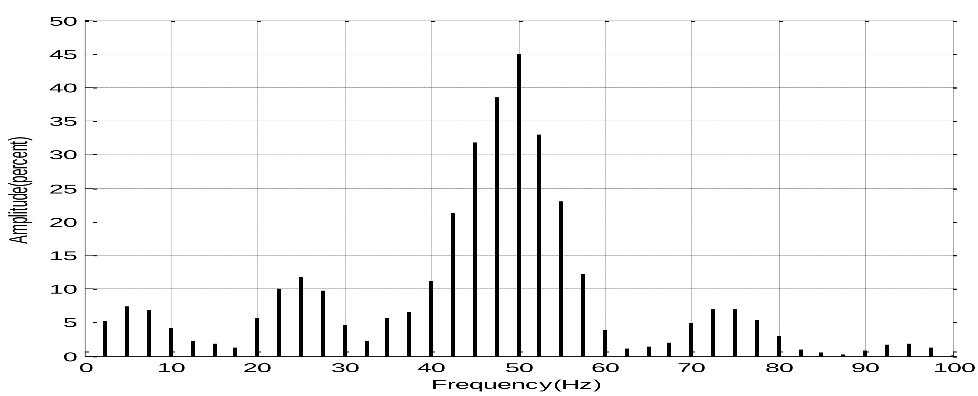
المقنن). ويتم الحصول على التأخير الزمني في فعل الإعتاق (الفصل) باستخدام وعاء توهين زيتي. ويسيطر حجم الفتحة التي يتم من خلالها حقن الزيت على زمن التأخير. أما الإعتاق اللحظي فيحصل عليه بواسطة صمام إمرار كبير. ويتم ضبط التنظيمات الميكانيكية الضرورية مسبقا لتعطي سلسلة معينة من الإعتاقات اللحظية أو المتاخرة إلى حد أربع مرات، ويتغير كلا النوعين من الإعتاق عكسيا مع تيار العطل حيث يقل زمن الإعتاق اللحظى من حوالي 0.3 ثانية إلى 0.06 ثانية. أما زمن الإعتاق المتأخر الأقصى فيكون من 40 ثانية إلى 0.7 ثانية للتيارات التي تتجاوز قيمتها ضعف أوعشرين مرة بقدر التيار المقنن على التوالي. أما أزمان الإعتاق المتأخر فيمكن تقليلها بزيادة حجم الفتحة فى وعاء التوهين وذلك لموافقة خواص المصهر.

فيما يلي تتابع نموذجي لغالق ذاتي أو بعبارة أخرى لعمليتي إعتاق لحظيتين متبوعتين بعمليتي إعتاق متأخرتي الزمن. فعند حدوث العطل ينعتق الغالق الذاتي لحظياً ليقلل الإضرار المحتملة نتيجة لتيار العطل ويبقى بعدها مفتوحاً لفترة زمنية كافية ـ الزمن الميت أو زمن الفتح ـ بحيث تتوقف فيها عملية التأين في القوس الكهربائي الناجم عن العطل. وقد يتغير الزمن الميت إعتماداً على نوعية الحمل. خذ مثلاً على ذلك المحركات الكهربائية، لكن هذا الزمن يكون بصورة عامة ثانية واحدة. عند ذلك يتم إعادة غلق الغالق الذاتي. وإذا كان العطل من النوع العابر فيجب إعادة تجهيز الطاقة بعدها إلى جميع المستهلكين. وخلافه فان الغالق الذاتي يفصل مرة ثانية وبصورة لحظية وينتظر ثانية واحدة أخرى ثم يعيد بعدها عملية الإغلاق. إن اكثرية الأعطال العابرة يتم إزالتها في الإعتاق الأول، بينما يتم إزالة البقية الباقية في الإعتاق الثاني. على أية حال إذا كان العطل من النوع الدائم فإن الإعتاق الثالث يكون متأخراً زمنياً بفترة كافية لصهر مصهر الخط الفرعي والذي يكون من النوع البطيء الإنصهار ويحمل تيار العطل. وإذا كانت عملية إعادة الغلق ناجحة بحيث يبقى الغالق الذاتى مغلقاً فان التجهيز يعود إلى جميع المستهلكين عدا الكائنين خلف موقع المصهر ويتيح الإعتاق الثاني المتأخر عملية إزالة الأعطال الدائمية المستعصية عند المصهر. وإذا لم تكن إزالة العطل قد تمت بعد فعندئذ يكمل الغالق الذاتي تتابعه بإعتاق ثانٍ متأخر ويمسك بعدها (يبقى مفتوحا). في هذه الحالة يجب التدخل وإعادة الوضع الميكانيكي بطريقة يدوية. وإذا تمت إزالة العطل قبل عملية الإمساك (التوقف) فان العملية الميكانيكية تعيد أوضاعها ذاتياً وحينئذ يمكن تكرار التتابع الكامل مرة أخرى إلا إذا حدث عطل آخر قبل أن تعاد الأوضاع إلى طبيعتها بصورة تامة.

تتم عملية حماية عطل الأرض بواسطة ثلاث محولات تيار مربوطة بصورة استبقائية (أي على التوازي) في جلبات عوازل الغالق الذاتي ويكون التنظيم حوالي 20 أمبيراً. وتكون جميع عمليات الإعتاق لحظية إلى أن يتوقف الغالق الذاتي عن العمل. (إن أخطر حالة تحدث لعطل الأرض عندما ينقطع موصل ويقع على أرض جافة أوأسيجة أو حواجز. . .الخ. حيث أن تيار العطل قد يكون أقل من 20 أمبير فتعتبر تقريبا حالة غير ممكنة الحماية).

18-11 تولد التوافقيات في خطوط النقل الرئيسية نتيجة عملية الغلق التلقائي
Harmonic generation in transmission lines due to autoreclosing

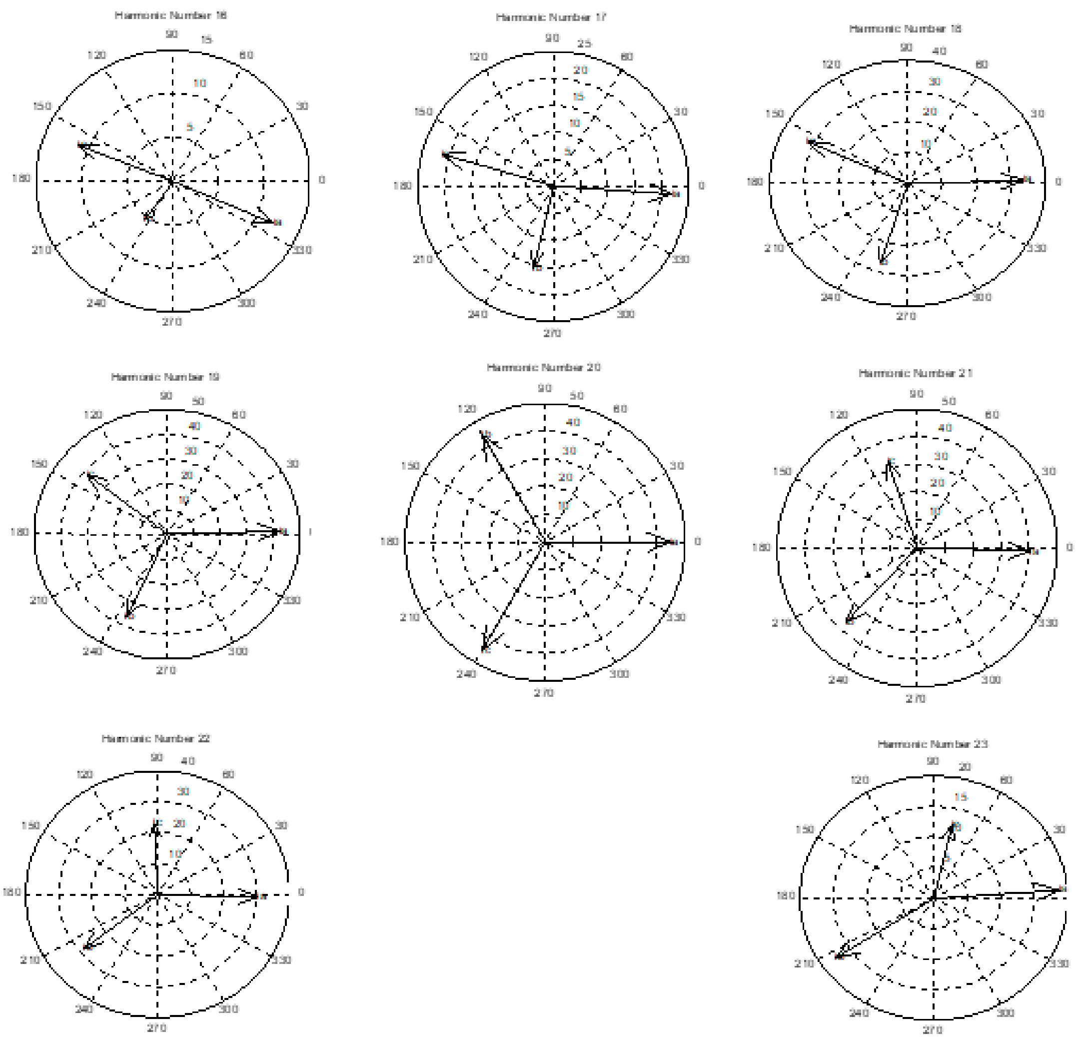
تتولد التوافقيات ضمن خطوط نقل الطاقة نتيجة لعملية الغلق التلقائي الذاتي عند استخدام الغوالق الذاتية. هذه التوافقيات التي تتولد بكثافة وحسب اختيار أزمان الغلق والأزمان الميتة ممكن أن تكون خطرة جداً على مكونات منظومة القدرة والمولدات في محطات التوليد نفسها إذا لم يتم اختيار حكيم لأزمان الغلق والفتح للغوالق الذاتية. ففي الغوالق الذاتية ذات الدورة الواحدة مثلاً يبين الشكل 11-31 طيف الترددات للتوافقيات التي تتولد في أحد الأطوار الثلاثة وليكن الطور A عندما يكون عدد الدورات في أزمان الغلق $N_1= 3$ و $N_2= 2$ ضمن عدد دورات التشغيل (الغلق + الفتح) $T_1=18$ و $T_2= 2$.



الشكل 11-31 طيف الترددات للتوافقيات المتولدة في موجة التيار خلال عملية الغلق الذاتي للقاطع التلقائي.

من الواضح في الشكل 11-31 أن موجة التيار المتولدة اثناء عملية الغلق والفتح تحتوي على كمية كبيرة من التوافقيات وخاصة التوافقيات ذات التردد دون التردد الأساسي لنظام القدرة (50 هرتز) فمثلاً تتولد توافقيات دون الأساسية 2.5 هرتز ومضاعفاتها (في حالتنا هذه)، وتوافقيات فوق

الأساسية قيمها تعطى بالعلاقة $50(1+1/T)$ هرتز . أما التوافقيات المؤثرة فهي تكون بين 40 و60 هرتز والتي يكون لها تأثير على مكونات المنظومة. إضافة إلى طيف التوافقيات واتساعاتها فان تحليلات فورير يمكن أن توضح بعضاً من علاقات الزوايا لكل توافقي في الأطوار الثلاثة كما مبين ذلك في الشكل 11-32 .

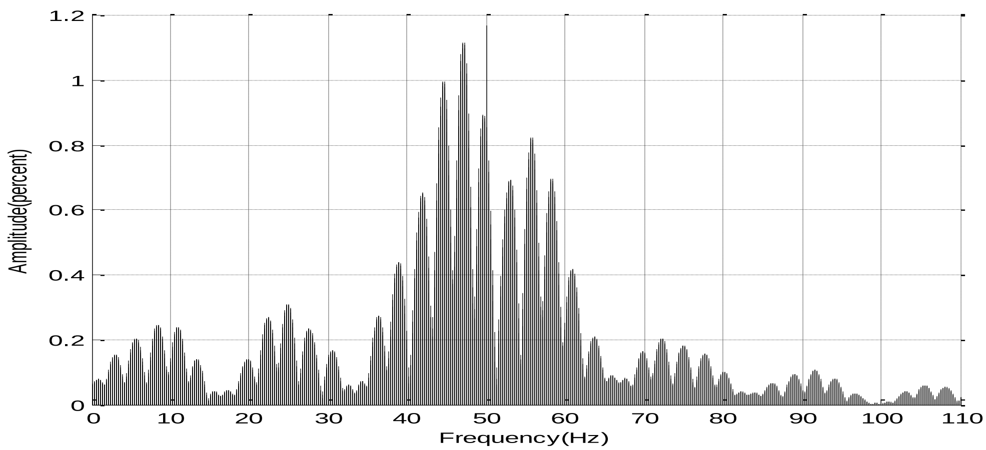


الشكل 11-32 طيف الترددات للتوافقيات المتولدة نتيجة الغلق التلقائي لدورة واحدة للأطوار الثلاثة لحالة $N_1=3, N_2=2, T_1=18, T_2=3$.

بالتمعن في الشكل 11-32 نجد أن التوافقيات المتولدة تكون غير متوازنة لا بالمقدار ولا بالزوايا، عليه يكون تأثير هذه التوافقيات تأثيراً سلبياً في منظومة القدرة وخاصة على المولدات ومحولات القدرة حيث بينت البحوث التي أجريت في هذا المجال الى أن التيارات غير المتوازنة

الناجمة عن هذه التوافقيات تنتج عزوماً مضادة للعزم الموجب المفيد الذي يتم توليده في المدورات الأساسية لتدوير المولد نفسه لأغراض توليد القوة الدافعة الكهربائية اللازمة مما يؤدي في كثير من الأحيان إلى كسر وتهشيم محور التدوير الميكانيكي للمولد نفسه Prime mover shaft.

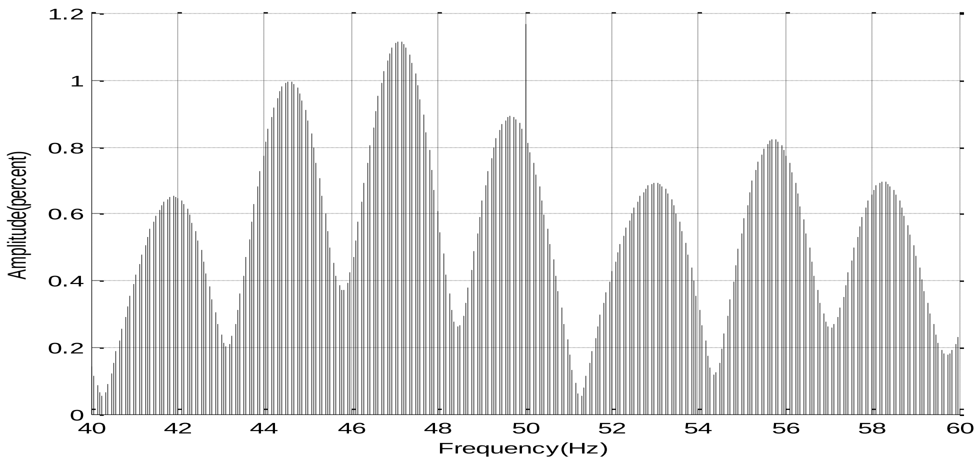
أما لحالة الغلق الذاتي لعدة دورات متتالية غلق وفتح: $N_1=N_2=N_3+N_4=3$ و $T_1=18$ و $T_2=753$ و $T_3=3503$، فإن مركبات التوافقيات التي تتولد تكون كثيرة العدد في الأطوار الثلاثة كما هو موضح في الشكل 11-33.



الشكل 11-33 طيف مقادير التوافقيات المتولدة لحالة الغلق التلقائي متعدد الدورات لعدد دورات غلق: $N_1=N_2=N_3+N_4=3$ لدورات متعاقبة من الفتح: $T_1=18$ و $T_2=753$ و $T_3=3503$ لمنظومة ثلاثية الطور.

والتوافقيات الأكثر أهمية المؤثرة هي تلك الموضحة في الشكل 11-34 خاصة تلك التي تتمحورحول التردد الأساسي (50 هرتز) التي تقع بين 40 و60 هرتز وقد وجد أن هذه التوافقيات لها تأثير كبير على المعدات الكهربائية في منظومة القدرة وخاصة المولدات الكهربائية إذ أن العزوم المتولدة من هذه التوفقيات غير المتوازنة في المقدار والزوايا كما في الشكل 11-32 تؤدي إلى كسر محور التدوير للمولد نفسه نتيجة تولد مجالات مغناطيسية غير متماثلة بسبب هذه التوافقيات.

إن مبدا قاطع الدائرة الذاتي يمكن أن يطبق أيضاً على خطوط الشبكة الكبرى وقد كان النوع القديم يدعى بالغالق الذاتي ذي السرعة العالية وذلك لأن زمنه الميت كان أقل من ثانية واحدة وفي أغلب الحالات يتم إبدال تلك الغوالق بغوالق ذاتية بطيئة السرعة أو غوالق ذاتية مؤخرة بسبب المشاكل الناجمة عن النوع ذي السرعة العالية.



الشكل 11-34 طيف الترددات التي لها تأثير ملحوظ والتي تتمركز بين 40 – 60 هرتز.

إن مستوى العطل على الشبكة الكبرى يكون من الكبر بحيث أن الأضرار التي يسببها تكون جسيمة حتى ولو بنبضة واحدة من تيار العطل. لذا فقد أستخدمت في السنين الماضية (وتستخدم لحد وقتنا الحاضر) طريقة إعادة الغلق بإطلاقة واحدة. وإذا تم فتح شبكة كبرى محملة فإن منطقة نهاية الإرسال يصبح لديها فائض من القدرة لذلك فأنها تتسارع بينما يحدث تباطؤ في منطقة نهاية الاستلام وبذلك تزداد زاوية الطور بين فولتية نهاية الإرسال وفولتية نهاية الإستلام. وقد ينتج تمور(هيجان) تيار إذا ما تم إقفال قاطع الدائرة. أما الزمن الأقصى الذي يمكن أن يبقى فيه خط الشبكة الكبرى مفتوحا (زمن إعادة ربط الدائرة) فيكون حوالي 0.5 ثانية بينما يكون الزمن الأدنى للتخلص الأيوني لقوس العطل (الزمن الميت) حوالي 0.3 ثانية.

الغوالق الذاتية يمكن إستخدامها فقط مع أنظمة حماية الوحدة ذات السرعة العالية وذلك لأن قواطع الدائرة في كلتا نهايتي الشكبة الكبرى يجب أن تفتح بصورة لحظية. أما زمن التشغيل القياسي للحماية فيكون 3 دورات (60 ملي ثانية) وزمن قاطع الدائرة الكلي يكون 6 دورات (0.12 ثانية)، أما قواطع الدائرة ذات الزيت الغزير أو القواطع ذات الدفع الهوائي فقد صممت خصيصا لتشغيل عملية قطع ـ وصل ـ قطع سريع ، أي أن تتابع الغلق يبدأ مباشرة أثر الشروع في تتابع الإعتاق وقبل انتهائه . ولم يستمر استخدام الغالق الذاتي ذي السرعة العالية بصورة كبيرة وسبب ذلك هو أنه إذا تم الغلق على عطل دائم فأن تارجح المنظومة خلال نبضتين من تيار العطل قد يسبب فقدان استقراريتها. ولايسمح للغالق الذاتي المتأخر أو ذي السرعة البطيئة بإعادة الغلق حتى يتم التاكد من بعض الامورالفنية الأخرى بحيث تتم عملية إعادة الغلق بأمان.

الفصل الثاني عشر
حسابات الأعطال في خطوط النقل
TRANSMISSION LINES FAULT CALCULATIONS

1-12 مقدمة

في الفصل التاسع تم التطرق إلى أنواع الأعطال التي تحدث في خطوط النقل وأسباب هذه الأعطال. في هذا الفصل سيتم التطرق إلى حسابات العطل التي تشمل إيجاد توزيع الفولتية والتيار في كل مكان على الخطوط خلال فترة العطل والتي يمكن أن يجري تيار عالٍ غير أعتيادي نتيجة لفولتية عالية غير أعتيادية على الخطوط بسبب صاعقة أوبسبب التمورات التي تحدث أثناء عمليات الفتح والغلق لهذه الخطوط Switching surges . هذه التمورات التي هي عبارة عن هيجان في التيارات تخرق أو تسبب شرراً عرضياً عبر سطوح عوازل الخطوط التي يفترض أنها كانت سليمة قبل ذلك أو أن يحدث تلف ناتج عن تأين عازل الوسط المحيط الذي يسبب تبعا لذلك شرارة كهربائية ذات قدرة كهربائية عظيمة.

في البداية سنتطرق أولاً إلى الأعطال الثلاثية الطور المتماثلة. ومن ثم سنتطرق إلى الأعطال غير المتماثلة مثل أعطال الأرض أو أعطال خط إلى خط وسنستعمل لهذه الأخيرة طريقة المركبات المتماثلة التي تم شرحها في الفصل الأول.

مما تجدر الإشارة إليه هو أنه عندما نذكر القدرة مقدرة بالـ MVA كارتباط مع مستوى العطل وقواطع الدائرة في أي مكان في منظومة القدرة فيجب أن يفهم بوضوح أن الفولتية التي يضرب بها التيار لأعطاء الفولت أمبير هي الفولتية المقننة لذلك الجزء من المنظومة وليست هي الفولتية الفعلية عند مكان العطل أوعلى خطوط النقل أو قواطع الدائرة . وبما أن الفولتية المقننة تكون دائما معروفة فان الـ MVA (في هذا المجال) تكون طريقة غير مباشرة لإعطاء تيار العطل. وعندما يمر تيار العطل من خلال محول ذي ملفين فان مقداره سيتغير ولكن الـ MVA للعطل لن تتغير. وهذا ما يعرف بالقدرة اللامتغيرة Invariant power . سيتم استخدام نظام نسبة الوحدة الذي تمت مناقشته في الفصل الأول لتحليل الأعطال خلال هذا الفصل.

2-12 عطل دائرة قصيرة ثلاثي الطور متماثل

Symmetrical 3-phase short-circuit fault

هذا العطل يعرف بكونه دائرة قصيرة آنية تحصل عبر الأطوار الثلاثة كلها في آن واحد وهذا النوع من الأعطال نادراً ما يحدث في الحياة العملية. فمثلا عند ربط الأطوار الثلاثة سوية

إلى الأرضي في أي خط لكي يكون أميناً عند إجراء عملية الصيانة عليه، إلا أن هذا الخط يتم تشغيله صدفة؛ أو بسبب البطء في إزالة العطل وكان هناك عطل أرضي فان هذا العطل سينتشر عبر الطورين الآخرين؛ أو عندما تقطع ماكنة حفر ميكانيكية كل الكيبل الناقل للطاقة وبسرعة. هذا النوع من العطل يعتبر مهم لكونه يؤدي إلى حسابات سهلة وبسيطة.

في الدائرة المتماثلة كلياً تكون الحسابات سهلة بصورة عامة لأنه يمكن أن نعاملها بوصفها ربطاً نجمياً أي أن المعدات مربوطة بشكل نجمي (أو يتم إبدالها بربط نجمي إذا كان الربط مثلثيا بحيث أن الحسابات يمكن أن تجرى على طور واحد من الدائرة. والحسابات في الدائرة الأحادية الطور هذه تتم باستعمال القوة الدافعة الكهربائية للطور (أي فولتية خط إلى محايد) وممانعات الطور ستعطينا التيار المار في طورواحد الذي يمكن من خلاله تعريف التيار في الطورين الآخرين لكون أنهما مساويان له في المقدار ومزاحان عنه بـ °120 و °240. عندما يكون العطل غير متماثل فهذه النظرية سوف لاتنطبق وسنحتاج إلى النظرية الأكثر شمولية التي تستعمل المركبات المتماثلة وكما تم بيان مبادئها في الفصل الأول.

إن تخمين الـ MVA المقننة التي نحتاجها لقاطع دائرة غالباً ماتجرى على أفتراض أنها يجب أن تتحمل وتزيل عطلاً ثلاثي الطورالذي هوالحالة الأسوأ بصورة عامة؛ لأنه من المعقول الأفتراض أن قاطع الدائرة يمكن أن يزيل أي عطل آخر، لذلك فان قدرة القطع المقننة لقاطع الدائرة بالـ MVA يجب ان تكون مساوية أو أكبرمن الـ MVA لمستوى عطل ثلاثي الطور.

بما أن قواطع الدائرة تصنع بالاحجام القياسية المفضلة مثلا 250 و 500 و 750 MVA فالدقة العالية ليست ضرورية في حسابات مستوى عطل ثلاثي الطور عند نقطة ما في منظومة القدرة. لذ لك من المناسب عمل الأفتراضات التالية:

(أ) قبل حدوث العطل مباشرة تكون المنظومة في حالة اللاحمل عند التردد المقنن وتهمل كل التيارات ما عدا تيار العطل. من المعتاد الافتراض أن كل المولدات تشتغل عند فولتياتها المقننه مثلا 17 و 33 كيلوفولت، إلا اذا أعطيت كميات غير ذلك، هذه المولدات مرتبطة فيما بينها بمحولات تعمل عند نسبة التحويل الملائمة، مثلاً 11/33 كيلوفولت.

(ب) تكون ق.د.ك لكل المولدات منطبقة الطور. وهذا يعني أن المنظومة ليست في حالة تأرجح أي أن التيارات المزامنة قد سحبت كل المكائن إلى التزامن (أوالطورالواحد) قبل حدوث العطل.

التأثير المشترك لكل من (أ) و(ب) يعني أن كل المولدات المغذية لخطوط النقل يمكن أن تبدل بمولد واحد مكافيء لكون أن كل القوى الدافعة الكهربائية لها متساوية في المقداروتساوية

في الطور. وكلمة متساوية هنا يجب أن تفسر على أنها متساوبة عند التعبير عنها بدلالة نسبة الوحدة (p.u.) أو بالفولت على مستوى الفولتية نفسه. هذه الطريقة تدعى أحيانا ربط المصادر على التوازي إلى قضيب توزيع ذي ق. د. ك. مشتركة (في المخططات فقط لأن ليس لها وجود فعلي في الحقيقة). أما ممانعات المولدات فتعامل بعد ذلك بوصفها جزء من شبكة ممانعة منظومة القدرة.

(ج) تهمل مقاومة المنظومة وتؤخذ المفاعلة الحثية للمنظومة فقط. هذا يعطينا أدنى قيمة لممانعة المنظومة وأقصى تيار عطل ونتائج حسابات قريبة من الواقع، والفائدة الكبيرة التي نحصل عليها من هذه الفرضيات أن كل المفاعلات والتيارات والفولتيات يمكن التعامل معها حسابياً. ويجب على القارئ أن يدقق في أن الفرق بين Z و X عندما تكون X = 5R هو حوالي 2% فقط. وهذا مقبول إذا علمنا أن ممانعات المنظومة من المحتمل أن لا تكون معطاة قيمها ومعلومة بدقة تزيد على حوالي 5% من قيمها الأصلية. وكما هو معروف فإن نسبة X/R للمولدات التزامنية تكون بحدود 20/1 وللمحولات حوالي 10/1 ولخطوط نقل الفولتية العالية فإن هذه النسبة تتراوح بين حوالي 8/1 إلى 3/1. أما إهمال المقاومة فيكون غير مقبول بالنسبة للخطوط العلوية المعلقة الخفيفة ذات 11 كيلوفولت فأدنى أو للكيبلات حيث أن X و R فيها غالباً ما تكونان متساويتين تقريباً. لكن في العديد من مثل هذه الحالات تكون المنظومة دائرة شعاعية (متوالية) بحيث يمكن استعمال Z = R + j X بسهولة. والطريقة هي تصغير المنظومة إلى مفاعلة واحدة ثم يحسب التيار عند نقطة العطل وتعاد متابعة خطوات الحسابات لإيجاد توزيع التيارات والفولتيات في كل جزء من أجزاء المنظومة.

إن كل الفرضيات أعلاه تكون ملائمة للحصول على تقديرلمستوى عطل ثلاثي الطور عند نقطة في منظومة القدرة. وللحصول على نتائج أكثر دقة يجب أن نأخذ في الحساب تيارات الحمل باستعمال نظريات الشبكات مثلاً نظرية ثفنن أونظرية التراكب Superposition، ومن الممكن أيضاً إضافة المقاومة R إلى ممانعة المنظومة. وباستعمال الحاسبات الرقمية الحديثة السريعة تصبح نتائج حسابات الأعطال في منظومات القدرة وخطوط النقل أكثر دقة وسهولة.

إذا أفترضنا حدوث دائرة قصيرة ثلاثية الطور متماثلة على منظومة ذات فولتية مقننة V_r وجعلنا الـ ق.د.ك / طور (ق.د.ك لقضبب التوزيع المشترك) تساوي E فولت خلف مفاعلة مقدارها X أوم / طور ممثلة للمنظومة ككل مصغرة إلى مفاعلة واحدة؛ فعندئذ يكون تيار العطل في الطورالواحد.

$$I_f = \frac{E}{X} \quad A \tag{12.1}$$

حيث E و X يجب أن تنسب لمستوى الفولتية نفسه في المنظومات المشتملة على محولات وغالباً ما تؤخذ هذه على أنها فولتية الطور المقننة V_r (المفروضة) ولو أنها ممكن أن تكون أكبر منها بقليل إذا كان تيار العطل محسوباً ضمن الدورة الأولى له أو لدورتين بعد حدوث الدائرة القصيرة. وبصورة عامة يكون مستوى العطل الثلاثي الطور مقدراً بالفولت أمبير VA كما يأتي:

$$(VA)_f = 3V_r \times \frac{E}{X} \quad \text{فولت أمبير} \tag{12.2}$$

عند التغيير إلى الترميز بنسبة الوحدة وباستعمال الرمز السفلي (b) للقيمة الأساس لأية كمية عندئذ

$$X_{pu} = X/X_b \quad \text{وكذلك} \quad E_{pu} = E/V_b \quad \text{و} \quad I_{f.pu} = I_f/I_b$$

إن المعادلة (12.1) يمكن أن تكتب كما يأتي:

$$I_{f.pu} = E_{pu}/X_{pu'} \tag{12.3}$$

والاساس المأخوذ بالفولت أمبير / طور= $V_b I_b$ وبذلك يكون فولت أمبير العطل بنسبة الوحدة

$$(VA)_{f.pu} = \frac{V_r \times (\frac{E}{X})}{V_b I_b} = \frac{E}{V_b} \times \frac{V_r}{I_b X}$$

من الضروري الملاحظة أن رقم 3 في المعادلة (12.2) قد ألغي تماماً في الفولت أمبير المعبر عنه بنسبة الوحدة في المعادلة أعلاه. وإذا كانت الفولتية الأساس مساوية للفولتية المقننة أي أن $V_b = V_r$ فأن هذه المعادلة تكتب كالآتي:

$$(VA)_{f.pu} = E_{pu}/X_{pu'} \tag{12.4}$$

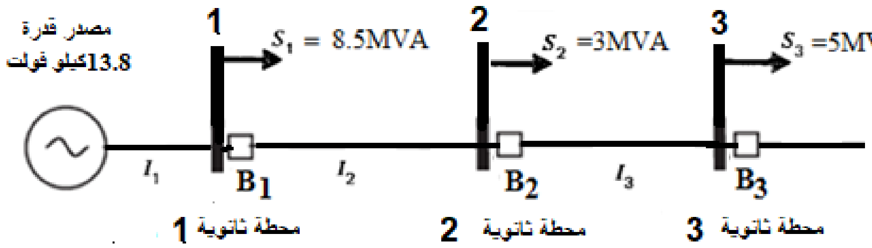
وغالبا ما تؤخذ E مساوية لـ V_r كما نوقشت أعلاه ولذلك تكون مساوية لـ V_b أي أن E = 1.0 بنسبة الوحدة. على هذا الأساس فالمعادلتان (12.3) و (12.4) يمكن أن تختصرا إلى

$$I_{f.pu} = 1/X_{pu} \tag{12.5}$$

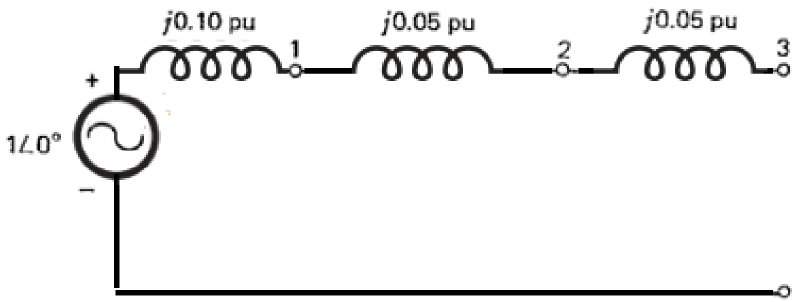
$$(VA)_{f.pu} = 1/X_{pu'} \tag{12.6}$$

مثال محلول 12-1

في خط النقل الشعاعي المغذى بفولتية 13.8 كيلو فولت والموضح في الشكل 12-1 (أ)، هذا الخط يغذي ثلاث محطات ثانوية تغذي أحمال كما مبينة في الشكل نفسه. بافتراض أن كل الأحمال لها نفس معامل القدرة وقدره 0.9. ممانعات خطوط النقل التي تربط بين المحطات الثلاثة وجهة التغذية معطاة بنسبة الوحدة كما في الشكل 12-1 (ب). إحسب تيار العطل على كل محطة من المحطات الثلاث لعطل ثلاثي الطور متماثل. افرض مستوى عطل مقداره 10 ميكافولت أمبير.



(أ)



(ب)

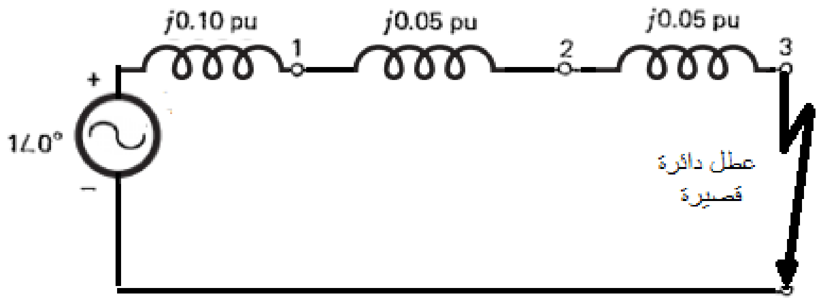
الشكل 12-1.

الحل :

لحساب تيار العطل في المحطة الثانوية رقم 3، أفرض أن عطل ثلاثي الطور متماثل حدث على قضيب التوزيع رقم 3، في هذه الحالة يؤخذ طور واحد فقط للتحليل أي أن المنظومة ترتبط مع بعضها كما في الشكل 12-2.

ممانعة التتابع الموجب Z_1 المكافئة للشكل 12-2:

$$Z_{1-3} = j0.10 + j0.05 + j0.05 = j0.2$$



الشكل 12-2 الدائرة المكافئة عند حدوث عطل ثلاثي الطور متماثل في المحطة الثانوية 3.

$$I_{3f(p.u.)} = \frac{V_{1(p.u.)}}{Z_{1-3}} = \frac{1}{0.2} = 5\ p.u.$$

تيار مستوى العطل

$$I_{3f} = \frac{MVA_f}{V\sqrt{3}} = \frac{10 \times 10^6}{13.8 \times 10^3 \times \sqrt{3}} = 418.3\ A$$

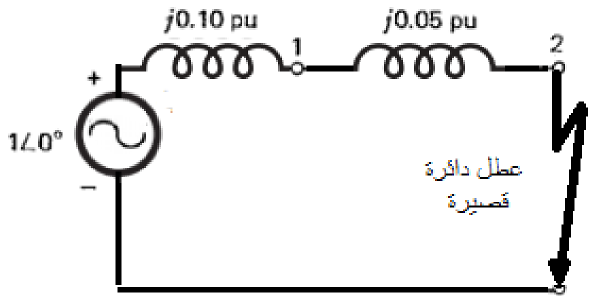
تيار العطل الحقيقي في المحطة رقم 3:

$$I_{3f_{\text{الحقيقي}}} = I_{3f(p.u.)} \times 418.3 = 5 \times 418.3 = 2092\ A$$

عند حصول عطل في المحطة الثانوية رقم 2 على فرض ان عطل ثلاثي الطور متماثل حدث على قضيب التوزيع 2، في هذه الحالة يؤخذ طور واحد فقط للتحليل أي أن المنظومة ترتبط مع بعضها كما في الشكل 12-3:

ممانعة التتابع الموجب Z_1 المكافئة للشكل 12-3:

$$Z_{1-2} = j0.10 + j0.05 = j0.15$$



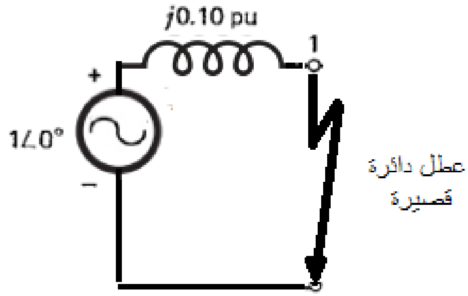
الشكل 12-3 الدائرة المكافئة عند حدوث عطل في المحطة الثانوية 2.

$$I_{2f(p.u.)} = \frac{V_{1(p.u.)}}{Z_{1-2}} = \frac{1}{0.15} = 6.67\ p.u.$$

تيار العطل الحقيقي في المحطة رقم 2:

$$I_{2f_{\text{الحقيقي}}} = I_{2f(p.u.)} \times 418.3 = 6.67 \times 418.3 = 2789\ A$$

عند حصول عطل في المحطة الثانوية رقم 1 على فرض ان عطل ثلاثي الطور متماثل حدث على قضيب التوزيع 1، في هذه الحالة يؤخذ طور واحد فقط للتحليل أي أن المنظومة ترتبط مع بعضها كما في الشكل 12-4:



الشكل 12-4 الدائرة المكافئة عند حدوث عطل في المحطة الثانوية 1.

ممانعة التتابع الموجب Z_1 المكافئة للشكل 12-4:

$$Z_{1-1} = j0.10 = j0.10$$

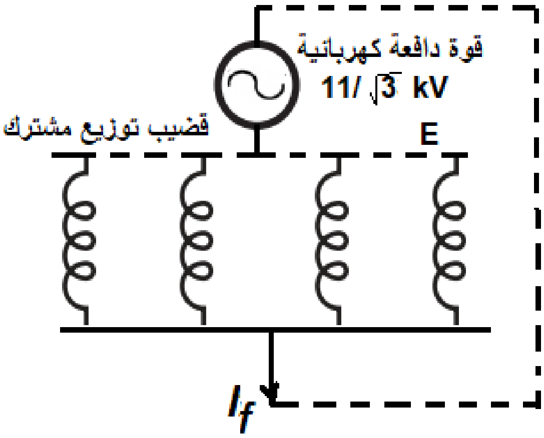
$$I_{1f(p.u.)} = \frac{V_{1(p.u.)}}{Z_{1-1}} = \frac{1}{0.10} = 10\ p.u.$$

تيار العطل الحقيقي في المحطة رقم 1:

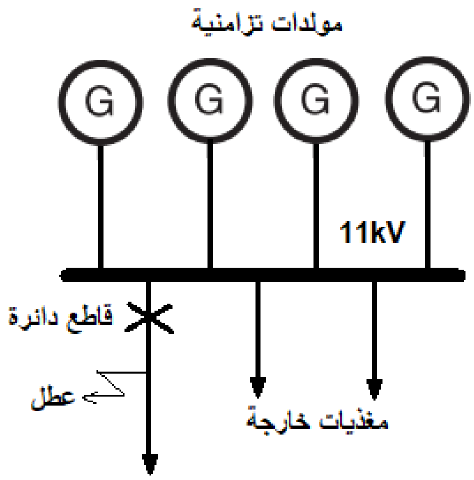
$$I_{1f_{\text{الحقيقي}}} = I_{1f(p.u.)} \times 418.3 = 10 \times 418.3 = 4183\ A$$

مثال محلول 12-2

الشكل 12-1(أ) يبين أربع مولدات مماثلة لبعضها مربوطة على التوازي وكل منها مقنن عند 11 كيلوفولت و 25 MVA وكل منها له مفاعلة (دون العابرة) مقدارها 16% محسوبة على مقننها (الحراري المستمر). جد مستوى العطل الثلاثي الطور عند أحد المغذيات الخارجة.



(ب)



(أ)

الشكل 5-12 عطل ثلاثي الطور.

الحل:

نأخذ كميات الأساس 11 كيلوفولت و 25 MVA ، فيكون مستوى العطل من مولد واحد:

$$(VA)_{f.pu} = 1/X_{pu} = 1/0.16 = 6.25\ p.u.$$

$$(VA)_f = 6.25 \times 25 = 156MVA$$

مستوى العطل الكلي للمولدات الأربعة $= 4 \times 25 \times 6.25 = 625$ ميكافولت أمبير. وهناك طريقة بديلة للحل: في الشكل 5-12 (ب) يبين المولدات الاربعة مربوطة على التوازي إلى القضيب الموصل ذي الـ ق.د.ك. المشتركة. مفاعلات المولدات تعامل هنا بوصفها جزء من مفاعلة المنظومة المربوطة على التوازي؛ والمفاعلة الكلية ستكون $0.16/4 = 0.04$ بنسبة الوحدة ومستوى العطل يكون:

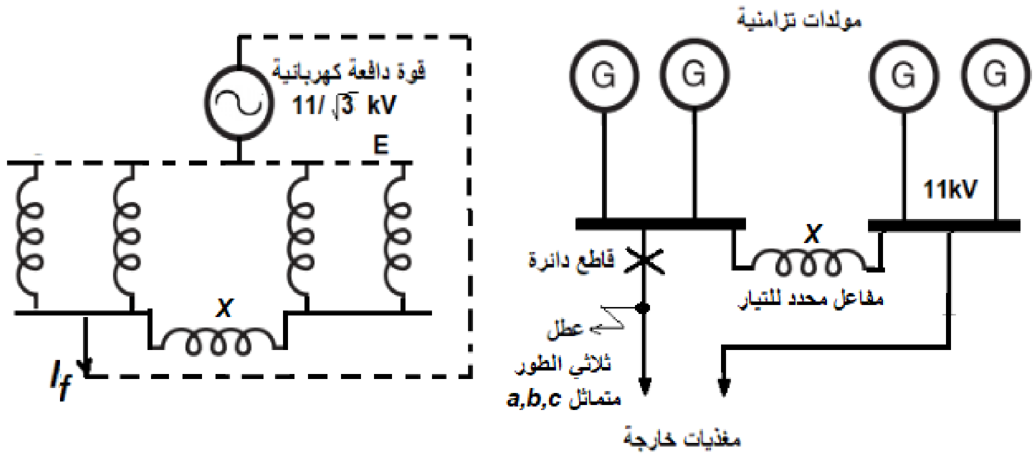
$$(VA)_{f.pu} = 1/0.04 = 25\ \text{p.u.}$$

$$\therefore\ (VA)_f = 25 \times 25 = 625\ MVA$$

3-12 طرق تحديد مستوى العطل باستخدام الملفات المفاعلة المحددة للتيار

CURRENT-LIMITING REACTORS

فى المثال 2-12 السابق كان مستوى العطل 625 MVA بينما تكون أقرب القيم المقننة لقواطع الدورة القياسية هي 500 و 750 ميكا فولت أمبير. فإذا كان من الضروري أستعمال قواطع دائرة سعة 500 MVA لأسباب أقتصادية فعندئذ يجب تقليل تيار العطل عن طريق زيادة مفاعلة المنظومة. فاذا كانت المنظومة في مرحلة التصميم فعلى المهندس المصمم أن يدقق في أنه إذا كان للمولدات المطلوب استخدامها مفاعلة دون العابرة 20% فسيكون ذلك هي القيمة المطلوبة للحل. أما إذا كانت المنظومة موجودة فعلاً فعندئذ من الضروري إضافة مفاعلات منفصلة أما على التوالي مع كل مولد أوعلى التوالي مع كل مغذ أو بتجزئة قضيب التوزيع وربط أجزائه عن طريق ملف مفاعل، وهذه طريقة متبعة دائماُ كما مبين في الشكل 6-12.



الشكل 6-12 قضيب توزيع مجزأ بملف مفاعل محدد للتيار.

مثال محلول 3-12

بأستعمال البيانات المعطاة في المثال 2-12 والدائرة المربوطة المبينة في الشكل 6-12؛ إحسب مفاعلة الملف المحدد للتيار X لكي يحد مستوى العطل على المغذي إلى 500 MVA .

الحل: لنأخذ قيم الأساس 11 kV و 25MVA

في الجزء الأيسر من الشكل 6-12 إثنان من المولدات التزامنية سيقومان بتغذية نصف مستوى العطل، أي يغذيان{ 625/2 = 312.5 MVA }مباشرة إلى محل العطل. لذلك فتغذية الجزء الآخر يجب أن تحدد إلى {500-312.5=187.5 MVA } وتساوي 187.5/25 بنسبة

الوحدة وتسا وي $1/X_t$ حيث أن X_t هي مفاعلة الجزء الأيمن الكلية مقاسة بنسبة الوحدة لذلك فان X_t=25/187.5=0.133 بنسبة الوحدة = 13.3%. بما أن هناك مولدين مربوطين على التوازي ولهما مفاعلة مشتركة 16÷2 = 8% فان ملف مفاعل قضيب التوزيع يجب ان يهيء المفاعلة المتبقية أي: 13.3-8 = 5.3 %. هذه قيمة المفاعلة بالنسبة المئوية، أما قيمة المفاعلة بالأوم فيمكن حسابها كما يأتي:

الفولتية الأساس = 1 بنسبة الوحدة = $11/\sqrt{3} = 6.36$ كيلوفولت

التيار الأساس = 1 بنسبة الوحدة = $25/(\sqrt{3} \times 11) = 1.31$ كيلو أمبير

المفاعلة الأساس 1= بنسبة الوحدة = $6.36/1.31 = 4.86$ أوم

ومفاعلة 0.053 بنسبة الوحدة = $0.053 \times 4.86 = 0.258$ أوم

ان مواصفات الملفات المفاعلة المحددة للتيار معطاة بالمواصفات الدولية أو المواصفات البريطانية القياسية B.S.S. 171 وسنبين الآن بعض النقاط البارزة التي يجب أن تؤخذ بعين الإعتبار عند اختيار المفاعل المحدد للتيار . التيارالمقنن هوالتيار الذي يستطيع أن يتحمله الملف المفاعل بصورة مستمرة بدون تجاوز درجة الحرارة الموصوفة أعتمادا على نوع العازل المستعمل. في المثال 12-3 من الممكن للملف المفاعل أن يكون مقننا لكي يحمل تياراً موافقاً إلى 25 MVA عند 11 كيلو فولت أي 1.31 كيلو أمبير بحيث أنه إذا أصاب العطل أحد المولدات فأنه من الممكن يتحمل حمل قدرة ولغاية 25 MVA من الجزء الأخر. لاحظ أن الفولتية المستعملة هي فولتية المنظومة المقننة وليست الفولتية بين طرفي طور واحد من الملف المفاعل.

إن الملفات المفاعلة المحددة للتيار يجب أن تكون لها مفاعلة ذات قيمة عالية كي تحد من تيار العطل ولكنها يجب أن لاتكون عالية جداً بحيث تسبب هبوط فولتية زائدا بسبب تيار الحمل . وبالنسبة لاستعمال ملفات مفاعلة لجزء من قضيب التوزيع كما مبين في الشكل 12- 6 يعد شئً مألوفاً لجميع مستويات الفولتية. وتوضع الملفات المفاعلة أحيانا في أجزاء من شبكات التوزيع إما لكي تحد من مستوى العطل أو لتسيطر على قسمة تيار الحمل بين الخطوط المتوازية التي تكوِن حلقة مغلقة بين محطتي توزيع.

4-12 الأعطال غير المتماثلة

العطل غير المتماثل هو أي عطل عدا العطل المتماثل الثلاثي الطور. مثلا عطل – أرض على طور واحد أوعطل خط الى خط (أوعطل طور إلى طور ويدعى أحيانا عطل طوري)

أوعطل أرض مزدوج (أوعطل خط إلى خط إلى الأرض). يستعمل الترميز a-e لعطل أرض على الطور a و b-c لعطل طوري عبر c و b . والمسائل المشتملة على أعطال غيرمتماثلة تحل عن طريق تحليل تيارات العطل غير المتماثلة إلى مركباتها المتماثلة. بعد ذلك يتم تحليل منظومة القدرة ثلاث مرات أي تحلل مرة واحدة لكل من مركبات التتابع الثلاث وبعد ذلك تجمع النتائج لكي تعطي تيار العطل الفعلي أو فولتية العطل أيهما يكون المطلوب.

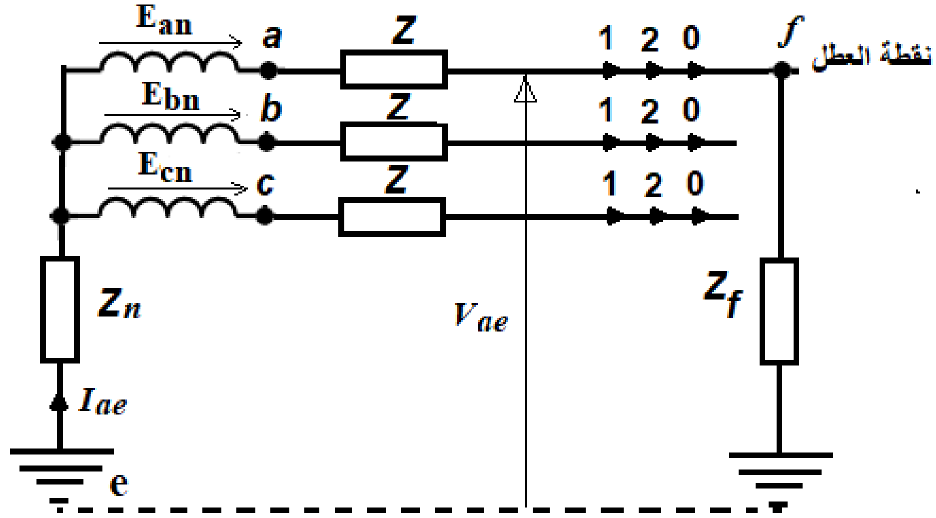
من المعتاد خلال حسابات العطل غير المتماثل (مالم ينص على نقيض ذلك صراحة) أن نأخذ أفتراضات التبسيط نفسها التي عملناها خلال دراسة الأعطال ثلاثية الطور المتماثلة بالتحديد وهو أن كل مصادر ق. د. ك. تؤخذ كونها متساوية (بنظام نسبة الوحدة) بحيث أنه يمكن إبدالها جميعاً بمصدر ق. د. ك. واحد. وإذا أستطعنا أن نهمل كل المقاومات فان المنظومة ستختزل إلى مصدر ق. د. ك. مفرد خلف مفاعلة مفردة في شبكة التتابع الموجب.

يجب أن يلاحظ في التحليلات التي تنتج أن الطور المرجع الذي يرمز له بالحرف يكون دائما الطور المتماثل نسبة إلى العطل أي في حالة عطل أرض فأنه يكون على الطور a بينما يكون الطوران b و c سليمين والعطل الطوري يكون عبر الطورين b وc بينما يكون الطور a سليماً . ويتم فعل ذلك لكي نحصل على أبسط النتائج بواسطة العلاقات الرياضيات. عند تطبيق هذه التحليلات بدلالة الأطوار abc على مسألة عملية بدلالة الأطوار RYB يجب أن نحافظ على التتابع الطوري الصحيح أي أنه إذا كان الطور a هو R فأن b سيكون Y و c سيكون B . والأسلوب نفسه ينطبق على تتابع الأطوار RST .

1-4-12 عطل أرض على الطور (a) Earth Fault on Phase- a

يبين الشكل 12-7 منظومة قدرة مبسطة غير محملة قد تم تمثيلها بمولد تزامني مكافئ حصل عليه عطل أرض على طور **a** عند النقطة f . نقطة التفرغ النجمي للمولد مؤرضة عبر ممانعة Z_n (تكون مقاومة عادة) ومسار العطل مبين وكأن له ممانعة Z_f (تكون مقاومة قليلة عادة). القوى الدافعة الكهربائية والممانعات للمولد المكافئ يفترض أن تكون جميعها متوازنة دائما إلى حد نقطة العطل بأستثناء نقطة العطل نفسها بحيث أنه لايكون هناك أي تقارن متبادل بين شبكات التتابع الثلاثة. تيار العطل هو I_{ae} . ومركبات التتابع للتيار في كل الأطوار الثلاثة مبينة كذلك.

الآن قبل الدخول في تحليل العطل للحالة أعلاه يجب علينا في البداية أن نتبصر في دراسة ملفات المولد التزامني التي تبين لنا أن المولد الاعتيادي وبدون أي عطل سيولد ق .د . ك. متوازنة ذات تتابع اعتيادي أي تتابع موجب abc فقط وهكذا فان ق .د. ك E_{an1} فقط ستتولد في



الشكل 12-7 عطل أرض على الطور a .

دائرة التتابع الموجب للطور a وتكون قيم E_{an2} و E_{an0} صفراً لعدم وجودهما ، وأن E_{an1} هي ق. د . ك. لخط إلى المحايد للمولد. أما Z_1 فهي ممانعة التتابع الموجب الوحيدة التي ستظهر بين نقطة التوليد ونقطة العطل عند اختصار ممانعات المنظومة كافة. فولتية التتابع الموجب للطور a إلى الأرض عند نقطة العطل V_{ae1} ستكون تبعاً لذلك كما يلي:

$$V_{ae1} = E_{an1} - I_{a1}Z_1 \qquad (12.17)$$

بما ان $E_{an2} = 0$ فيما يخص التتابع السالب فإن مركبة التتابع السالب للطور a إلى الأرض عند نقطة العطل هي

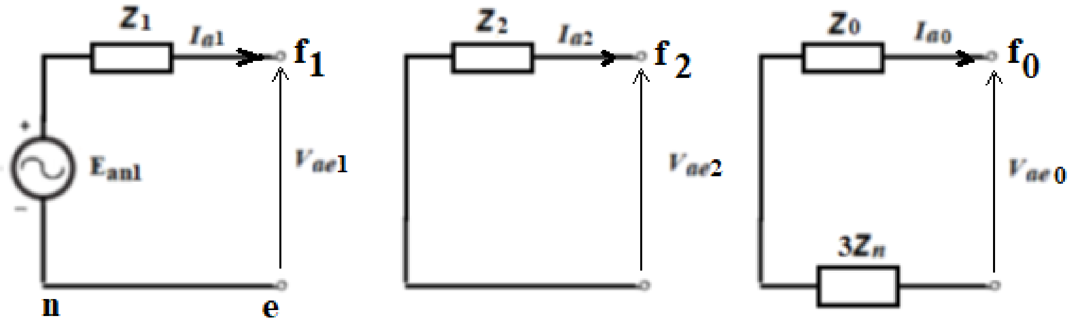
$$V_{ae2} = -I_{a2}Z_2 \qquad (12.18)$$

أما فيما يخص التتابع الصفري فاذا اعتبرنا أن المصدر هو عبارة عن مولد تزامني مفرد ذو نقطة نجمية مؤرضة خلال ممانعة Z_n فعندئذ تبين لنا المعدلة (1.8) في الفصل الأول، إن Z_n تحمل تياراً مقداره $3I_{a0}$ مسببة هبوط فولتية مقداره $3I_{a0}Z_n$. ولكي نعطي هبوط الفولتية نفسه فان شبكة التتابع الصفري المبينة في الشكل 12-8 تبعا لذلك يجب أن تحتوي على ممانعة مقدارها $3Z_n$. لذلك فإن

$$V_{ae0} = -I_{a0}(Z_0 + 3Z_n) = -I_{a0}Z'_0 \qquad (12.19)$$

وفرق الجهد بين الطور a والأرض عند نقطة العطل هو V_{ae} ويحسب كما يلي :

$$V_{ae} = V_{ae1} + V_{ae2} + V_{ae0} = E_{an1} - I_{a1}Z_1 - I_{a2}Z_2 - I_{a0}Z'_0 \qquad (12.20)$$



الشكل 12-8   شبكات التتابع الثلاث.

وبالطريقة نفسها يمكننا إيجاد V_{be} و V_{ce} من (1.9) المعطاة في الفصل الأول.

$$V_{be} = h^2 V_{ae1} + hV_{ae2} + V_{ae0}$$

$$\therefore V_{be} = h^2(E_{an1} - I_{a1}Z_1) - hI_{a2}Z_2 - I_{a0}Z'_0 \qquad (12.21)$$

وكذلك

$$V_{ce} = hV_{ae1} + h^{2V_{ae2}} + V_{ae0}$$

$$\therefore V_{ce} = h(E_{an1} - I_{a1}Z_1) - h^2 I_{a2}Z_2 - I_{a0} \qquad (12.22)$$

من الواضح أنه لا يجري أي تيار في شبكات التتابع الثلاث عندما تكون معزولة عن بعضها وكما مبين في الشكل 12-8.

الطريقة المتبعة هنا وكذلك في التحليلات التالية ستكون بكتابة معادلات الدوائرالثلاث للأطوار a و b و c التي تعرف ظروف العطل بدلالة تيارات وفولتيات الطور الفعلية عن طريق فحص مخطط الدائرة.

$$V_{ae} = Z_f I_{ae} \qquad (12.23)$$

$$I_{be} = 0 \qquad (12.24)$$

$$I_{ce} = 0 \qquad (12.25)$$

وبأستعمال العلاقات المعطاة في (1.9) في الفصل الأول؛ هذه الفولتيات والتيارات يمكن أن نستبدل بها مجموع مركباتها المتماثلة، والمعادلات (12.23) و (12.24) و (12.25) ستصبح:

$$V_{ae1} + V_{ae2} + V_{ae0} = Z_f(I_{ae1} + I_{ae2} + I_{ae0}) \qquad (12.26)$$

حيث ان V_{ae1} و V_{ae2} و V_{ae0} هي المركبات المتماثلة لفرق الجهد بين الطور المرجع والارض عند نقطة العطل f .

$$h^2 I_{ae1} + h I_{ae2} + I_{ae0} = 0 \tag{12.27}$$

$$h I_{ae1} + h^2 I_{ae2} + I_{ae0} = 0 \tag{12.28}$$

وبطرح (12.28) من (12.27)نحصل على

$$(h^2 - h) I_{ae1} + (h - h^2) I_{ae2} = 0$$

$$I_{ae1} = I_{ae2}$$

وبتعويض هذه النتيجة فى (12.28)

$$(h + h^2) I_{ae1} + I_{ae0} = 0$$

وبما أن $h + h^2 = -1$ فأن

وبذلك

$$I_{ae1} = I_{ae0}$$

$$I_{ae1} = I_{ae2} = I_{ae0} = I_{ae}/3 \tag{12.29}$$

المعادلة (12.29) تبين أنه لهذا العطل المحدد ستكون تيارات التتابع الثلاثة في طور a كلها متساو ية بالضبط في المقدار ومتطابقة في الطور.

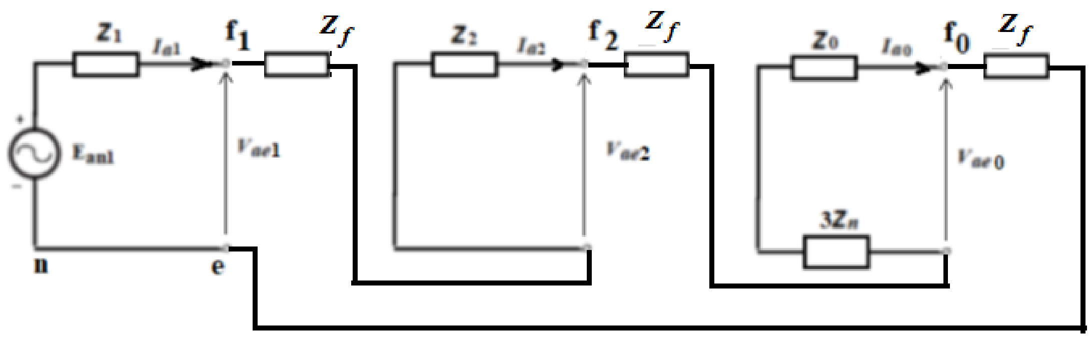
وبأعادة ترتيب الحدود في (12. 26) نحصل على ترابط شبكات التتابع الضروري لتحقيق المعادلتين (12.29) و (12.30) والمبين في الشكل 12- 8 حيث أن

$$\left(V_{ae1} - Z_f I_{ae1}\right) + \left(V_{ae2} - Z_f I_{ae2}\right) + \left(V_{ae0} - Z_f I_{ae0}\right) = 0 \tag{12.30}$$

$$I_{ae1} = I_{ae2} = I_{ae0} = \frac{E_{an}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_n + 3Z_f} \tag{12.31}$$

وتيار العطل يكونْ

$$I_{ae} = \frac{3E_{an}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_n + 3Z_f} \tag{12.32}$$



الشكل 12-9 ترابط شبكات التتابع لعطل أرض على الطور المرجع a.

إذا كانت نقاط التفرع النجمي للمنظومة مؤرضة مباشرة فان $Z_n = 0$ وإذا كان العطل دائرة قصيرة (أي أنه ذو ممانعة مهملة) فعندئذ $Z_f = 0$ والشكل 12-9 يتقلص إلى توصيل متوالٍ بسيط لشبكات التتابع الثلاث ذي تيار عطل معطى بالمعادلة

$$I_{ae} = \frac{3E_{an}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \qquad (12.33)$$

أما الفولتيات إلى الأرض للطورين السليمين b وc عند نقطة العطل فيمكن أن نجدها من المعادلتين (12.21) و (12.22) .

مثال محلول 12-4

مولد تزامني ثلاثي الطور 33 كيلوفولت 37.5 ميكافولت أمبير مربوط إلى خط علوي معلق 33 كيلوفولت وتعرض هذا الخط إلى عطل أرض على أحد الموصلات عند الطرف البعيد. مفاعلات التتابع الموجب والسالب والصفري للمولد هي 18 و 12 و 10 % (على المقنن) ومفاعلات الخط هي 6.3 و 6.3 و 12.6 أوم لكل موصل . إحسب تيار العطل وفولتيات الطور عند أطراف المولد، أفرض أن نقطة التفرع النجمي للمولد مؤرضة مباشرة.

ا لحل:

نأخذ قيم الأساس 37.5 MVA (ثلاثة اطوار) ، 33- kV (خط)

الفولتية الأساس بنسبة الوحدة :

$19.1 = 33/\sqrt{3} = 1\, p.u.$ كيلوفو لت / طور

التيار الأساس بنسبة الوحدة:

$0.655 = 37.5/(\sqrt{3} \times 33) = 1\ p.u.$ كيلو أمبير

المفاعلة الأساس بنسبة الوحدة:

$29.1 = 19.1/0.655 = 1\ p.u.$ أوم

لذلك

6.3 أوم $= 6.3/29.1 = 0.2165\ p.u.$

المفاعلة الكلية للشبكة المكافئة لشبكات التتابع الثلاث على التوالي (الشكل 12-9) تكون

$$X_t = j[(0.18 + 0.2165) + (0.12 + 0.2165) + (0.1 + 0.433)]$$

$$= j1.266\ p.u.$$

$$I_{ae1} = 1\ \angle 0^{\circ}\ /j\ 1.266 = -j0.791\ p.u.$$

وتيار العطل يكون $I_{ae} = -j0.791 \times 3 \times 0.655 = -j1.555\ kV$

الفوتيات نسبة إلى الأرض عند طرفي المولد تحسب باستعمال المعادلات (12-17) و (12-18) و(12-19) حيث أن المفاعلات هي تلك المحسوبة من المصدرإلى طرفي المولد.

$$V_{ae1} = 1 \angle 0^{\circ} - (-j0.791)(+j0.18) = 0.858 + j0\ \ p.u.$$

$$V_{ae2} = -(-j0.791)(+j0.18) = 0.858 + j\ 0\ p.u.$$

$$V_{ae0} = -(-j0.791)(+j0.1) = -0.0791 + j\ 0p.u.$$

$$V_{ae} = V_{ae1} + V_{ae2} + V_{ae0} = 0.6841\ \angle 0^{\circ}\ p.u.$$

$$= 0.6841 \times 19.1 = 13\angle 0^{\circ} kV$$

$$V_{be} = h^{2V_{ae1}} + hV_{ae2} + V_{ae0} = 0.945\angle - 119.16^{\circ} p.u.$$

$$= 18\ \angle - 119.16^{\circ}\ \ kV$$

$$V_{ce} = 18\ \angle + 119.16^{\circ}\ \ kV$$

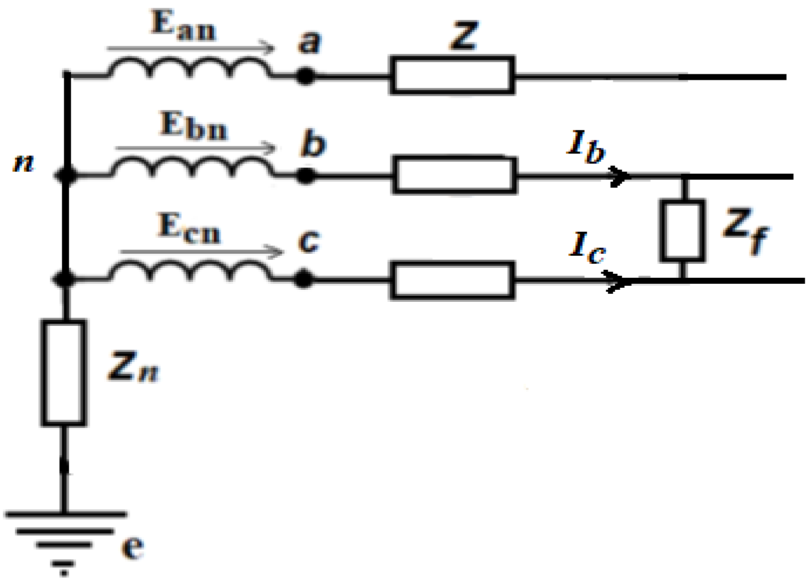
ميكا فولت أمبير العطل = $19.1 \times 1.555 = 29.6$ ميكا فولت أمبير

من الناحية العملية تؤرض المولدات عادة خلال مقاومة ذات قيمة حوالي 100% محسوبة على تقنين المولد. القيمة المناظرة التي يجب ان تضاف الى X_t تكون 300% أي (3 p.u) وبذلك تصبح الممانعة الكلية لشبكة العطل المكافئة $3 + j\ 1.266\ p.u.$

2-4-12 عطل خط الى خط (عطل طوري) عبر الخطين b و c

Line-to-Line (Phase-Fault) Across Lines **b** and **c**

الشكل 12-10 يبين منظومة العطل. يجب أن نلاحظ أن الاتجاه الموجب المألوف لسريان التيار أخذ وكأنه يبتعد من المصدر. لاتوجد فولتية عبر Z_n والتيار I_{a0} يكون صفرا لإنه لايوجد طريق للتيار يتمكن من خلاله ان يجري إلى نقطة التفرع النجمي للمصدرعن طريق الأرض.



الشكل 12-10 عطل خط إلى خط عبر b , c.

بفحص الشكل 12-10 يمكننا ان نكتب

$$I_a = 0, \qquad I_b = -I_c$$

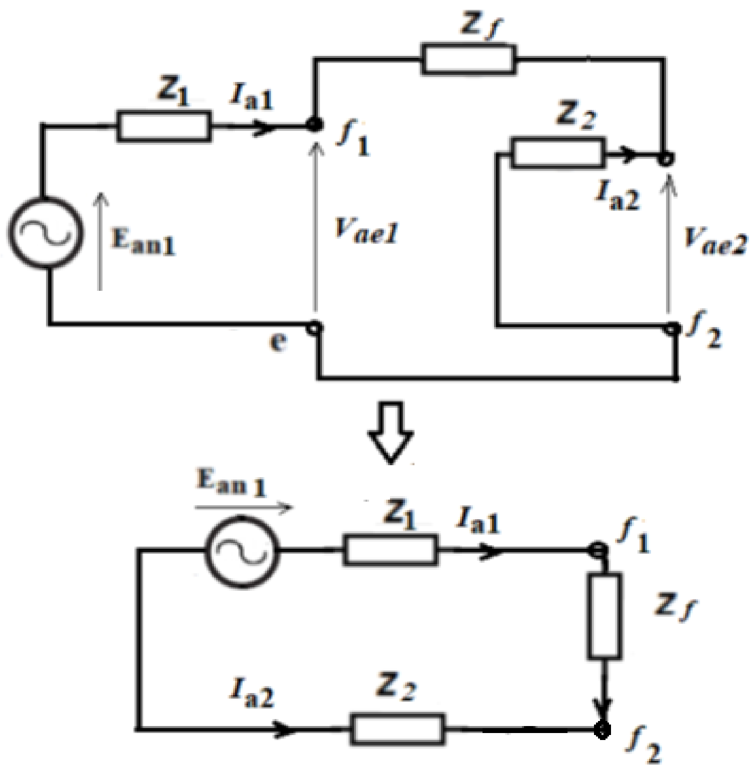
وكذلك $$V_{be} - Z_f I_b = V_{ce}$$

على القارئ أن يبين أنه بواسطة تحويل التيار والفولتيات في هذه المعادلات الثلاث إلى مركباتها المتماثلة وحل هذه المعادلات سنحصل على النتائج التالية:

$$I_{a1} = -I_{a2} \tag{12.34}$$

$$V_{ae1} - V_{ae2} = Z_f I_{a1} \quad (12.35)$$

يمكننا أن نحقق المعادلتين (12.34) و (12.35) عن طريق الربط المتداخل لشبكات التتابع المبينة في الشكل 12-8 من (12.34) و (12.35) أو بواسطة فحص الشكل 12-11 يمكننا أن نحصل على:



الشكل 12-11 ترابط شبكات التتابع لعطل طوري.

$$I_{a1} = \frac{E_{an}}{Z_1 + Z_2 + Z_F} \quad (12.36)$$

ومن المعادلة (1.9) يمكننا بسهولة أن نبين (قد يرغب القارئ تحقيق ذلك بنفسه) أن تيار العطل يمكن أن يعطى بالمعادلة:

$$I_b = -\mathrm{j}\sqrt{3I_{a1}} = -I_c \quad (12.37)$$

مثال محلول 12-5

باستعمال البيانات في المثال 12-4 ولكن مع دائرة قصيرة بين الخطين b و c عند النقطة f بدلا من العطل السابق. احسب تيار العطل والفولتية الى الارض للخط السليم عند نقطة العطل.

الحل:

المفاعلة الكلية لشبكة العطل المكافئة بنسبة الوحدة من الشكل12-11 تكون

$$X_t = j[(0.18 + 0.2165) + (0.12 + 0.2165)] = j0.733\ p.u.$$

$$I_{a1} = 1\angle 0^{\circ}/j0.733 = -j1.365\ p.u.$$

وتيار العطل يكون

$$I_b = -j\sqrt{3} \times I_{a1} = -j\sqrt{3}(-j1.365) = -2.36\ p.u.$$

$$= 2.36 \times 0.655\angle\ 180^{\circ} = 1.545\angle 180^{\circ} kA$$

وعند نقطة العطل

$$V_{ae1} = (1 + j0) - (-j1.365)(+j0.3965) = 0.459 + j0 p.u.$$

على القارئ أن يثبت أن

$$V_{ae2} = 0 - (+j1.365)(+j0.3365) = V_{ae1}$$

كون أن $Z_f = 0$

لذلك $$V_{ae} = V_{ae1} + V_{ae2} = 0.918\ \angle 0^{\circ}\ p.u.$$

$$= 17.5 \quad \angle 0^{\circ}\ kV$$

وميكا فولت أمبير العطل = $51 = 33 \times 1.545$

3-4-12 عطل دائرة قصيرة بين خط إلى خط إلى الأرض على الطورين b و c

Line to Line to Earth Short Circuit on Phase b and c

في حالة حدوث دائرة قصيرة مباشرة إلى الأرض على الطورين b و c ، فان فحص الدائرة لهذا العطل يعطينا

$$I_a = 0, \qquad V_{be} = 0\ , \qquad V_{ce} = 0$$

بتحويل هذه المعادلات الثلاث الى مركباتها المتماثلة نحصل على :

$$I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} = 0 \tag{12.38}$$

$$V_{ae1} = V_{ae2} = V_{ae0} \tag{12.39}$$

يمكننا أن تحقق المعادلتين (12.38) و (12.39) من الدائرة المبينة في الشكل 12-12 ومنها يمكن أن نرى أن:

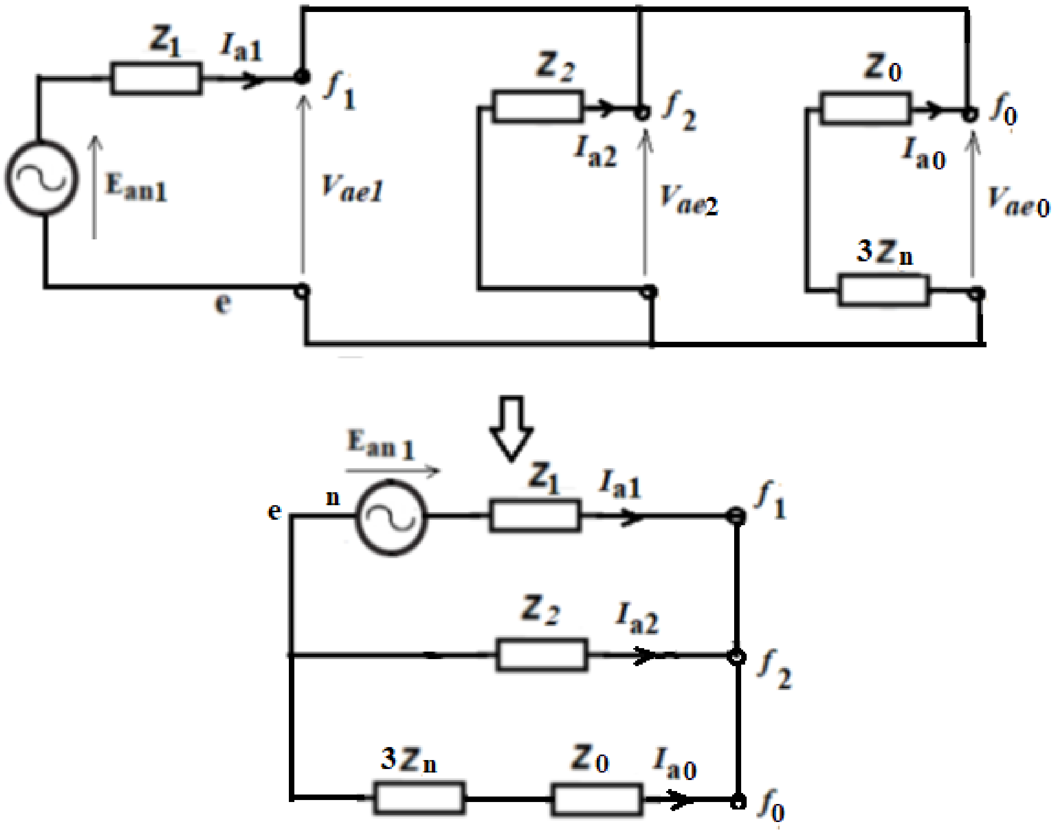
$$\begin{cases} I_{a1} = \dfrac{E_{an}}{Z_1 + Z_2 Z'_0/(Z_2 + Z'_0)} \\ I_{a2} = -I_{a1} \times \dfrac{Z'_0}{Z_2 + Z'_0} \\ I_{a0} = -I_{a1} \times \dfrac{Z_2}{Z_2 + Z'_0} \end{cases} \tag{12.40}$$

من المعادلة (12.19) يمكننا أن نلاحظ أنه إذا كانت نقاط التفرع النجمي للمصدر مؤرضة مباشرة (أي أن $Z_n = 0$) فعندئذ Z'_0 تصبح Z_0 والتي تمثل ممانعة التتابع الصفري المؤثرة المفردة المناظرة إلى كل الأجهزة المربوطة بين التوليد والعطل. كما يمكننا أن نحصل على تياري الخطين المعرضين للعطل من المعادلات في كل من (12.40) و (1.9). وتيار العطل فى المسار الأرضي يكون $I_b + I_c = 3I_{a0}$.

4-4-12 الحالة العامة لعطل ارضي مزدوج على الطورين b و c

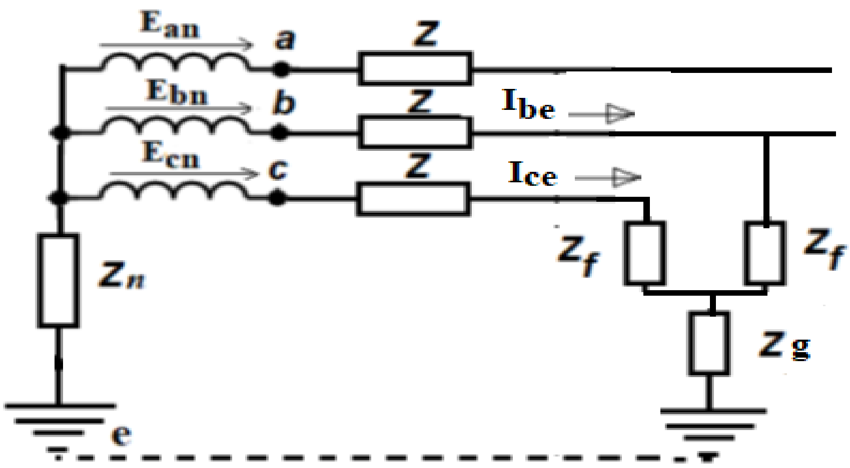
General Case of Double-Earth-Fault on Phase b and c

الحالة العامة لعطل أرضي مزدوج والذي يكون متماثلا نسبة إلى الطور المرجع a هي عطل يحدث بين الطورين b و c مع نقطة المنتصف لممانعة العطل $2Z_f$ بين الطورين مربوطة



الشكل 12-12 ترابط شبكات التتابع لدائرة قصيرة خط الى خط الى ارضي على b و c.

إلى الأرض عن طريق ممانعة Z_g ، أنظر الشكل 12-13. لقد لاحظنا الآن أن طريقة المركبات المتماثلة يمكن تبسيطها إلى حد كبير إذا تم تطبيقهاعلى أعطال متماثلة بالنسبة إلى الطور المرجع a ؛ ومرة أخرى يجب أن تكون المنظومة متوازنة من نقطة التوليد إلى نقطة العطل.



الشكل 12-13 عطل أرض مزدوج عام على الطورين b و c.

الطريقة التي استعملت هنا هي نفسها باتباع الطريقة التي استعملت في الفقرة 12-4-1 بالضبط. فالمعادلات الثلاث التى يمكن أن تكتب للفولتيات والتيارات الفعلية عند نقطة العطل هي

$$I_{ae} = 0 \tag{12.41}$$

$$V_{be} = \left(Z_f + Z_g\right)I_{be} + Z_g I_{ce} \tag{12.42}$$

$$V_{ce} = Z_g I_{be} + \left(Z_f + Z_g\right)I_{ce} \tag{12.43}$$

وبكتابة هذه التيارات وفرق الجهد بين موصلات الخط والأرض عند نقطة العطل على أنه حاصل جمع مركباتها المتماثلة نحصل على

$$\mathrm{I}_{ae1} + I_{ae2} + I_{ae0} = 0 \tag{12.44}$$

$$h^{2V_{ae1}} + hV_{ae2} + V_{ae0}$$
$$= \left(Z_f + Z_g\right)(h^2 I_{ae1} + hI_{ae2} + I_{ae0}) + Z_g(hI_{ae1} + h^2 I_{ae2} + I_{ae0}) \tag{12.45}$$

$$hV_{ae1} + h^2 V_{ae2} + V_{ae0}$$
$$= Z_g(h^2 I_{ae1} + hI_{ae2} + I_{ae0}) + (Z_f + Z_g)(hI_{ae1} + h^2 I_{ae2} + I_{ae0}) \tag{12.46}$$

وبطرح (12.46) من (12.45) نحصل على:

$$(h^2 - h)V_{ae1} + (h - h^2)V_{ae2}$$
$$= Z_f(h^2 I_{ae1} + hI_{ae2} + I_{ae0}) - Z_f(hI_{ae1} + h^2 I_{ae2} + I_{ae0})$$

وبتجميع حدود التتابع الموجب سوية إلى الجانب الايسر وحدود التتابع السالب إلى جهة اليمين تصبح النتيجة

$$(h^2 - h)\left(V_{ae1} - Z_f I_{ae1}\right) = (h^2 - h)(V_{ae2} - Z_f I_{ae2})$$

$$V_{ae1} - Z_f I_{ae1} = V_{ae2} - Z_f I_{ae2}$$

وبتعويض هذه النتيجة فى المعادلة (12.46) تعطينا

$$h(V_{ae1} - Z_f I_{ae1}) + h^2 (V_{ae1} - Z_f I_{ae1}) + (V_{ae0} - Z_f I_{ae0})$$
$$= Z_g[(h^2 + h)I_{ae1} + (h^2 + h)I_{ae2} + 2I_{ae0}]$$

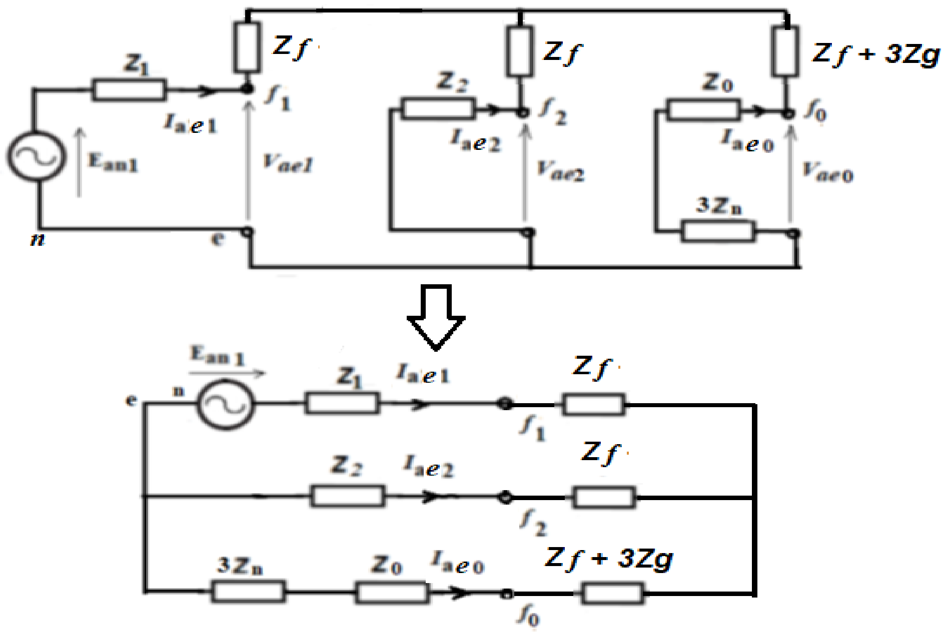
والمعادلة الاخيرة يمكن تبسيطها إلى

$$V_{ae1} - Z_f I_{ae1} = V_{ae0} - Z_f I_{ae0} - Z_g(-I_{ae1} - I_{ae2} + 2I_{ae0})$$

من المعادلة (12.44) $(-I_{ae1} - I_{ae2}) = I_{ae0}$ لذا :

$$V_{ae1} - Z_f I_{ae1} = V_{ae2} - Z_f I_{ae2} = V_{ae0} - (Z_f + 3Z_g) I_{ae0} \quad (12.47)$$

المعادلتان (12.44) و (12.47) يمكن تحقيقهما عن طريق الربط المتداخل لشبكات التتابع المبينة في الشكل 12-14.



الشكل12-14 ترابط شبكات التتابع لعطل أرضي مزدوج عام على الخطين b و c.

من هذا العطل العام يمكننا ان نحصل على نتائج عدد من الأعطال الأقل تعقيدا والتي يكثر احتمال حدوثها في الواقع ويشمل ذلك تلك الأعطال الى اوجزت في الفقرة 12-4-2 التي فيها $(Z_g = \infty$ و $Z_F = 2Z_f)$ والفقرة 12-4-3 $(Z_g = 0$ و $Z_f = 0)$.

12-4-5 عطل أرض ثلاثي الطور عام غير متوازن

General Unbalanced Three-Phase-Earth Fault

يبين الشكل 12-15 حدوث عطل أرض على الأطوار الثلاثة كلها في آن واحد والذي يكون متماثلا نسبة إلى الطور المرجع a. مرة أخرى فإن المعادلات التي يمكن كتابتها من فحص الدائرة هي كالآتي:

$$V_{ae} = Z_f I_{ae} + Z_g(I_{ae} + I_{be} + I_{ce})$$

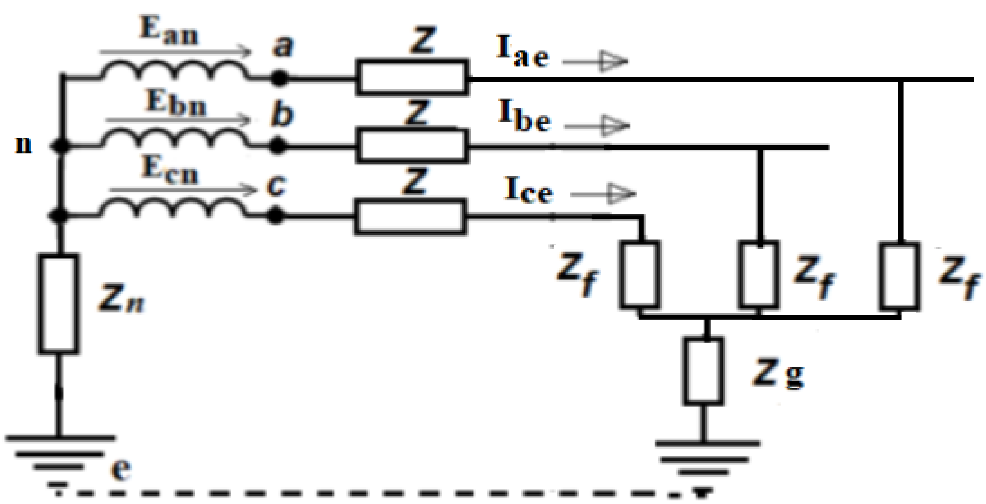
$$V_{be} = Z_p I_{be} + Z_g(I_{ae} + I_{be} + I_{ce})$$

$$V_{ce} = Z_p I_{ce} + Z_g(I_{ae} + I_{be} + I_{ce})$$

بعد تحويل المعادلات أعلاه إلى مركباتها المتماثلة نحصل على المعادلتين:

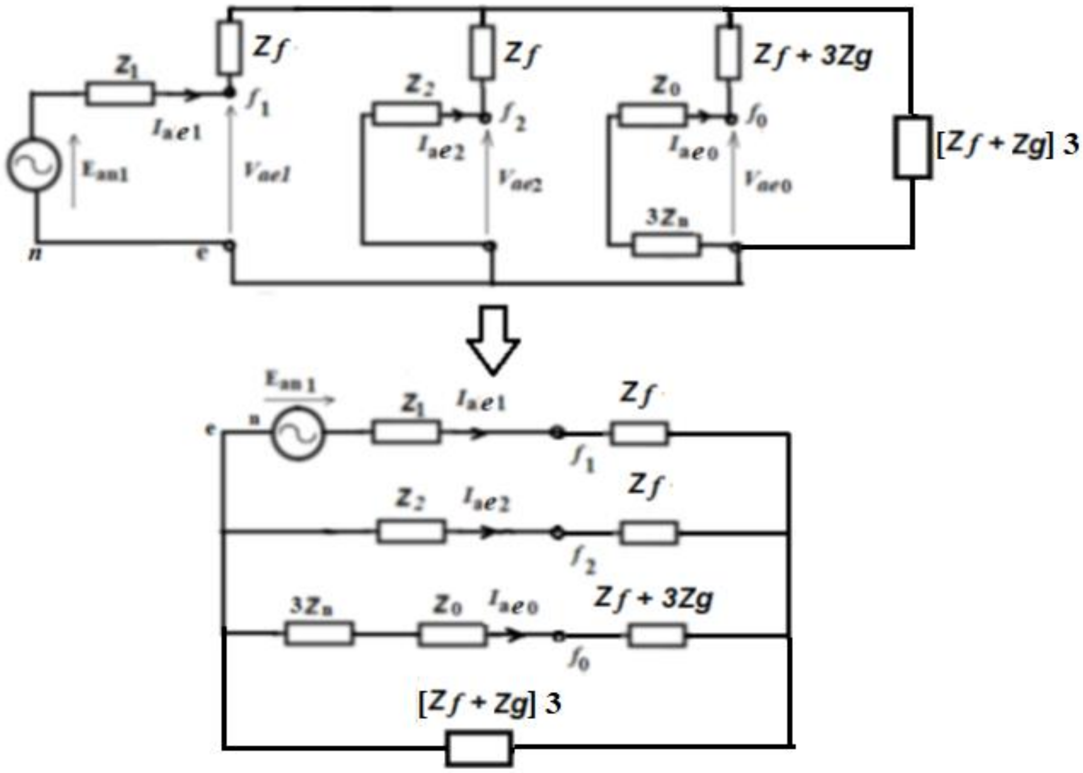
$$V_{ae1} - Z_P I_{ae1} = V_{ae2} - Z_P I_{ae2} = V_{ae0} - \left(Z_P + 3Z_g\right) I_{ae0} \qquad (12.48)$$

$$V_{ae1} - Z_P I_{ae1} = (1/3)(Z_f - Z_P)(I_{ae1} + I_{ae2} + I_{ae0}) \qquad (12.49)$$



الشكل 12-15 عطل أرض ثلاثي الطور غير متوازن.

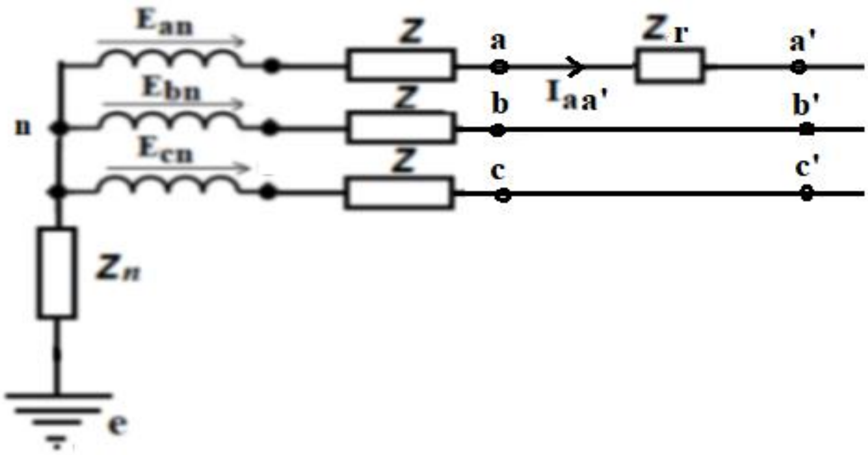
هاتان المعادلتان (12.48) و(12.49) يمكن تحقيقهما بالربط المتداخل لشبكات التتابع في الشكل 12-16 والتي منها يمكن أن نستنتج ظروف الفقرات (12-4-2) و(12-4-3) و(12-4-4) عدا ما يخص الفقرة (12-4-1).



الشكل12-16 ترابط شبكات التتابع لعطل أرض ثلاثي الطور غير متوازن.

6-4-12 عطل توالٍ على طور a   Series Fault on Phase a

إذا حدث قطع في موصل أحد الأطوارلخط نقل مع حدوث شرارة عبر هذا القطع فإن هذا يكافيء ظهور ممانعة Z_r على التوالي مع هذا الطور مع بقاء الطورين الآخرين بدون مثل هذه الممانعة وكما مبين في الشكل12-17.



الشكل 12-17 عطل توال على الطور a.

بتفحص الدائرة يمكننا كتابة المعادلات الخاصة بهذا الطرف كما يأتي:

$$V'_{aa} = Z_r I'_{aa} \quad (12.50)$$

$$V'_{bb} = 0 \quad (12.51)$$

$$V'_{cc} = 0 \quad (12.52)$$

وبتحويل المعادلات أعلاه إلى مركباتها المتماثلة نحصل على

$$V_{aa'1} + V_{aa'2} + V_{aa'0} = Z_r(I_{aa'1} + I_{aa'2} + I_{aa'0}) \quad (12.50)$$

$$h^2\, V_{aa'1} + hV_{aa'2} + V_{aa'0} = 0 \quad (12.51)$$

$$hV_{aa'1} + h^2\, V_{aa'2} + V_{aa'0} = 0 \quad (12.52)$$

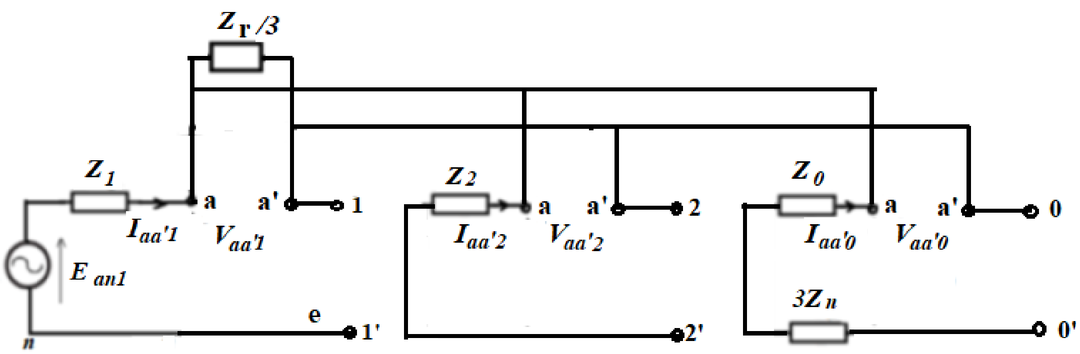
المعادلتان (12.51) و (12.52) تعطينا $V_{aa'1} = V_{aa'2}$ وبتعويض هذه النتيجة في إحدى هاتين المعادلتين نحصل على

$$V_{aa'1} = V_{aa'2} = V_{aa'0} \quad (12.53)$$

بتعويض المعادلة (12.52) فى المعادلة (12.50) نحصل على

$$V_{aa'1} = (Z_r/3)(I_{aa'1} + I_{aa'2} + I_{aa'0}) \quad (12.54)$$

المعادلتان (12.53) و (12.54) يمكن تحقيقها من الربط المتداخل لشبكات التتابع كما في الشكل 12-18. يجب أن نلاحظ أن بين الأطراف 1 و $1'$ و 2 و $2'$ و 0 و $0'$ تم ربط



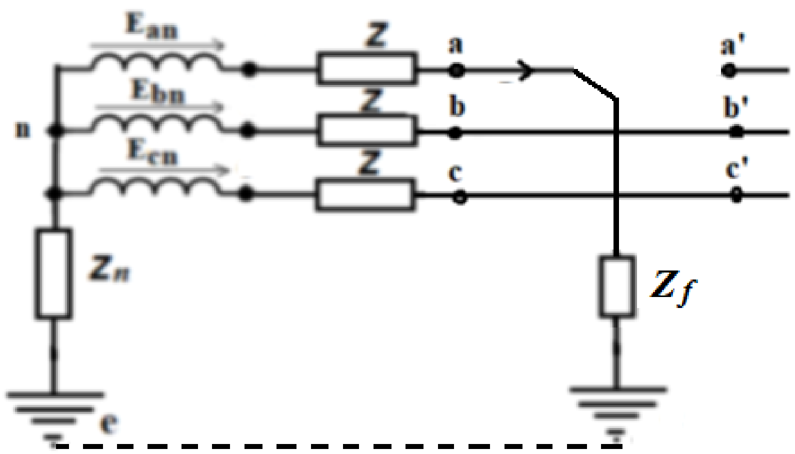
الشكل 12-18 ترابط شبكات التتابع لعطل توال في الطور a.

ممانعات تتابع الطور (خط إلى محايد) الموجبة والسالبة والصفرية بالتتابع للدائرة التي على يمين الأطراف a' و b' و c' في الشكل 12-18. أما إذا تم أخماد شرارة الموصل المقطوع فان Z_r في الشكلين 12- 17 و12-18 سوف تصبح قيمتها مالانهاية (= ∞).

12-4-7 أعطال توالِ وتوازٍ في آن واحد على الطور a

Simultaneous Shunt and Series Faults on Phase a

إذا انقطع موصل الطور a فمن المحتمل أن يمس الطرف الذي من جهة المصدر الأرض عن طريق ممانعة إلى الأرض مقد ارها Z_f وكما مبين في الشكل 12-19. لهذا الظرف يمكن تطبيق المعادلات (12.29) و (12.30) و (12.53) و (12.54) لكي نبني دائرة مكافئة لشبكات التتابع الثلاث والتي ستحقق كل المعادلات الأربع المذكورة، لكن من الضروري إضافة محولات عزل مثالية نسبة التحويل فيها 1 : 1 كما مبين في الشكل 12-20 . ومرة أخرى فإن أية مصادر قدرة مربوطة إلى يمين النقاط $a'b'c'$ يجب أن تربط إلى يمين النقاط $11'$ و $22'$ و $00'$ ، فمثلا إذا كانت المصادر التي على اليمين تحتوي على توليد مباشر فان شبكات التتابع الموجبة والسالبة والصفرية الخاصة بها يجب أن تربط عبر $11'$ و $22'$ و $00'$ على التوالي.

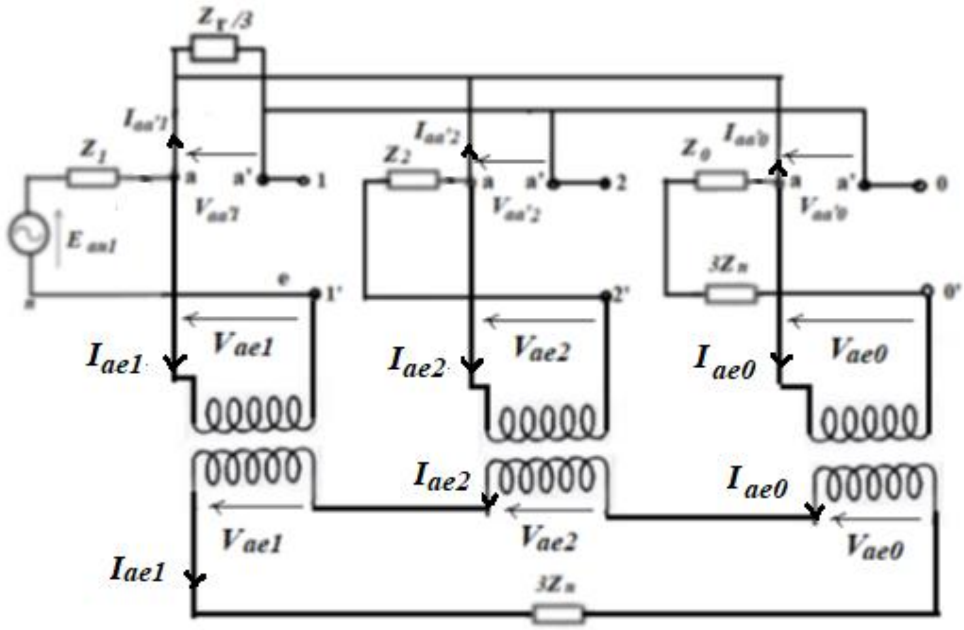


الشكل 12-19 موصل الطور a مقطوع ومتصل بالأرض.

12-5 فولت أمبير العطل Fault Volt-Amperes

يسمى فولت أمبير العطل عادة بمستوى العطل ويعطى بوحدة الـ MVA وهو حاصل ضرب تيار العطل مع الفولتية المقننة للمنظومة (وليست الفولتية عند نقطة العطل). في حالة عطل أرض فان الفولتية المستعملة هي فولتية خط إلى محايد (أوالطورإلى محايد) بينما لعطل

طوري تكون الفولتية المستعملة هي فولتية خط إلى خط وتهمل زوايا الطور في هذا المضمار وتؤخذ بنظر الاعتبار القيم اللامتجهة فقط.



الشكل 12-20 ترابط شبكات التتابع لموصل الطور a مقطوع ومتصل بالأرض.

سنبين الآن كيف أن مستويات العطل بالفولت أمبير يمكن أن نحصل عليها مباشرة من الشبكات المكافئة للعطل إذا استعملنا نظام نسبة الوحدة. أفرض أن Z_t تمثل الشبكة المكافئة للعطل وبذلك فلعطل أرض (الشكل 12-9):

$$Z_t = Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_n + 3Z_f$$

ولعطل طوري (الشكل 12-11):

$$Z_t = Z_1 + Z_2 + Z_F$$

افرض أن V_r تمثل فولتية الطور المقننة لذلك الجزء من المنظومة التي حدث العطل عليها فعندئذ، إذا أخذنا القيم المقننة قيم أساس فإن الفولت أمبيرالأساس الثلاثي الطوريكون:

$$3V_r I_r = 3V_r^2/Z_r$$

ولعطل أرض فالمعادلة (12.33) تبين أن مقدار فولت أمبير العطل يكون:

$$VA_{\text{العطل}} = 3V_r . E_{an}/Z_t$$

وفي نسبة الوحدة

$$VA_{\text{العطل}_{pu}} = \frac{3V_rE_{an}}{(3V_r^2/Z_r)Z_t} = \frac{E_{an}/V_r}{Z_t/Z_r} = \frac{(E_{an})_{pu}}{(Z_t)_{pu}} \qquad (12.55)$$

وبالتشابه فانه لعطل طوري؛ تبين المعادلتان (12.36) (12.37) أن

$$VA_{\text{العطل}} = \sqrt{3}V_r.\sqrt{3}E_{an}/Z_t$$

$$VA_{\text{العطل}_{pu}} = \frac{3V_rE_{an}}{(3V_r^2/Z_r)Z_t} = \frac{E_{an}/V_r}{Z_t/Z_r} = \frac{(E_{an})_{pu}}{(Z_t)_{pu}} \qquad (12.56)$$

إذا اعتبرنا أن الـ ق. د. ك خلف العطل مساوية للفولتية المقننة (وهذا الفرض هو ليس بعيداً كثيراً عن الحقيقة بالنسبة لدورات الفولتية القليلة الأولى بعد حدوث العطل؛ فعندئذ كما في العطل الثلاثي الطور المتماثل (الفقرة 12-3) تتبسط المعادلتان (12.55) و (12.56) إلى:

$$VA_{\text{العطل}_{pu}} = \frac{1}{(Z_t)_{pu}}$$

إن الفولت أمبير العطل هذا يمكن التعبير عنه نسبة إلى قيمة الفولت أمبير الأساس الثلاثي الطور؛ وهذا منطقي لأنه من المعتاد أن نعطي الفولت أمبير الأساس بوصفه قيمة ثلاثية الطور.

6-12 المقارنة بين مستويات العطل Comparison of Fault Levels

سنقارن الآن بين المقادير النسبية لتيارات العطل وفولت أمبير العطل آخذين العطل الثلاثي الطورعطلاً قياسياً للمقارنة باعتبار قيمته 1 بنسبة الوحدة (1.0 p.u.). وسنفترض للسهولة أن مقاومة المنظومة مهملة وأن $X_1 = X_2$ ، أي أنه ستؤخذ المفاعلة دون العابرة بالنسبة للمولدات ونفرض أنها X_1. سنفترض كذلك أن مفاعلة العطل تكون مهملة. وبما أن النقطة الأساسية للمبحث هنا هي أن نبين أن عطلاً أرضياً قرب نقطة محايد مصدر مؤرض مباشرة يمكن أن يزيد مستوى العطل إذا كان العطل ثلاثي الطور. لذلك سنفترض أن المنظومة مؤرضة مباشرة.

(أ) عطل ثلاثي الطور

تيار العطل = E_{an}/X_1

فولت أمبير VA العطل = $3V_r E_{an}/X_1$

(ب) عطل أرض

تيار العطل = $3E_{an}/(X_1 + X_2 + X_0)$

ويمكن أن يعبر عنها بدلالة نسبة الوحدة من قيمة عطل ثلاثي الطور

تيار العطل = $3X_1/(2X_1 + X_0)$ بنسبة الوحدة

إذا كانت $X_0 = X_1$ فأن تيار عطل أرض = 1.0 بنسبة الوحدة

إذا كانت $X_0 < X_1$ فأن تيار عطل أرض > 1.0 بنسبة الوحدة

$$VA_{\text{العطل}_{pu}} = 3V_r E_{an}/(X_1 + X_2 + X_0)$$

ومرة أخرى بنسبة الوحدة من قيمة عطل ثلاثي الطور فتكون

$$VA_{\text{العطل}_{pu}} = X_1/(2X_1 + X_0)p.u.$$

هذا العطل ستتم إزالته من على قطب واحد من قاطع دائرة ثلاثي الطورله ثلاثة أقطاب متماثلة. وهكذا فأن قدرة القطع (الـ VA) للأطوار الثلاثة المقنن لقاطع الدائرة سيكون.

$$3X_1/(2X_1 + X_0)p.u.$$

وبذلك فالأستنتاجات تكون كما يأتي: لتيار عطل أرض وبالتحديد إذا كانت $X_0 = X_1$ فان قاطع الدائرة نفسه سيفصل لعطل ثلاثي الطور أوعطلاً أرضياً، لكن إذا كانت $X_0 < X_1$ فان عطل الارض يحتاج إلى قاطع دائرة ذي قيمة مقننة أكبر. بما أن شبكة التتابع الصفري تمتد فقط من نقطة العطل رجوعاً إلى أقرب محول ملفه الأبتدائي يكون نجمي الربط غير مؤرض أو مربوطاً بشكل مثلثي (دلتا)؛ بينما تمتد شبكة التتابع الموجب رجوعاً إلى المولدات التي في المصدر وهذا غالباً مايحدث عندما تكون $X_0 < X_1$.

(ج) دائرة قصيرة بين خط إلى خط (عطل طوري)

تيار العطل = $\sqrt{3}E_{an}/2X_1$

= $\sqrt{3}/2 = 0.867$ بنسبة الوحدة

$\sqrt{3}.\sqrt{3}V_r E_{an}/2X_1$ = العطل VA

= 0.5 بنسية الوحدة

وبما أن هذا العطل قد تتم أزالته بواسطة قطبين من أقطاب قاطع الدائرة الثلاثة، فأن التقنين الثلاثي الطور المناظر لقاطع الدائرة يكون

$$(3/2)0.5 = 0.75\ p.u.$$

هذا المبحث أو المثال البسيط يوضح لنا لماذا يكون العطل الطوري غيرمهم نسبياً بصورة عامة.

الملحق رقم 1 : مسائل حول فصول الكتاب

الفصل الثاني

1. خط 132 كيلوفولت ثلاثي الطور طوله 100 كيلومتر وله ممانعة توالٍ مقدارها 0.125+j0.335 أوم/ طور/ كيلومتر. إذا كان الهبوط بالفولتية محدد بـ 10% من الفولتية المقننة (المقررة)؛ احسب القدرة عند طرف الاستلام لعامل قدرة 0.8 متأخر إذا كانت الفولتية عند كلا طرفي الخط مساوية للفولتية المقننة.

(الجواب: 318 MW)

2. خط نقل طاقة قصير له مقاومة توالٍ مهملة ومفاعلة توالٍ مقدارها 16 أوم/ طور. القدرة الداخلة إلى الخط للطور الواحد 20 MW و 16 MVAr بعامل قدرة متأخر ، فإذا كانت فولتية طرف الاستلام V_R=100+j0 كيلوفولت فاحسب كلاً من V_S و I_S .

الجواب :(102+j3.2 كيلوفولت / طور ، 200+j150 أمبير)

3. خط نقل طاقة ثلاثي الطور فولتية الخط له عند طرف الاستلام 33 كيلوفولت وله ممانعة توالٍ مقدارها 2.48+j6.57 أوم/ طور/ كيلومتر. الحمل عند طرف الاستلام هو 10 MW بعامل قدرة متأخر 0.85.

(أ) احسب فولتية الخط إلى الطور عند طرف الإرسال وكذلك فولتية الخط إلى الخط.
(ب) احسب زاوية الحمل.
(ت) احسب تنظيم الفولتية للخط.

(الجواب: (أ) 20737 بزاوية 3.49 درجة، 35916 فولت، (ب) .49 درجة، (ت)8.83)

4. خط نقل له مفاعلة توال لكل طور مقدارها 24 أوم محسوبة في تردد المصدر 50 هرتز، مقاومة التوالي لهذا الخط مهملة لصغرها. إذا كانت الفولتية عند طرف الاستلام 132 كيلو فولت والفولتية عند طرف الارسال 140 كيلو فولت وذلك عندما يكون التيار المنقول 500أمبير؛ فاحسب القدرة الفعالة والقدرة المتفاعلة المناظرتين المجهزتين عند طرف الاستلام.

(الجواب: 49.7 MW، 1.54 MVAr)

5. خط قصير له ممانعة توال مقدارها j30+10 أوم / طور ومقدار فولتية الارسال 140 كيلو فولت وفولتية الاستلام 120 كيلو فولت وزاوية الحمل مقدارها 5 درجات . احسب القدرة وعامل القدرة عند طرف الاستلام.

(الجواب: MW 67.8، 0.783 متأخر)

6.خط نقل له ثوابت A=0.90 ∠2°، B=140∠70° أوم/ طور. فولتية الخط عند طرف الاستلام 132 كيلو فولت يغذي حملاً مقداره MVA60 ذي عامل قدرة 0.8 متأخر. احسب فولتية الخط لطرف الارسال وكذلك زاوية الحمل.

(الجواب: 176.5 كيلو فولت ، 12.8 درجة)

7.خط نقل ثلاثي الطور له مقاومة مقدارها 10 أوم/طور ومفاعلة حثية مقدارها 30 أوم/ طور. احسب أعظم قدرة يمكن أن ينقلها هذا الخط عندما تكون فولتية طرف الاستلام 132 كيلو فولت وفولتية طرف الارسال 135 كيلو فولت.

(الجواب: MW 390)

8.خط نقل طويل متجانس ثلاثي الطور مفتوح الدائرة عند طرف الحمل. أعطى المعلومات التالية خلال عملية الفحص (جميع القيم أخذت للطور الواحد):

فولتية طرف الحمل 200 ∠0° كيلو فولت ، فولتية طرف الارسال 180 ∠5° كيلو فولت ، تيار طرف الارسال 200 ∠92° أمبير . احسب ثوابت الخط A و B وC و D . احسب كذلك فولتية الدخل والقدرة وعامل القدرة لحمل ذي فولتية 200 كيلو فولت / الطور مقداره MW 40 لكل طور بعامل قدرة واحد.

(الجواب: A=0.9 ∠5°، B= 242∠53.2° أوم ، C= 1 ∠92° ملي سيمنس ،D= 0.9 ∠5° . فولتية الدخل = 216 كيلو فولت، القدرة = MW 48.5 ، عامل القدرة = 0.808 متقدم.

الفصل الثالث

1. خط 132 كيلوفولت ثلاثي الطور يغذي حمل متوازن له موصلات مصمتة ذات قطر 2 سم والمسافة بين مراكزها هي 3.65 5.5 و 8.2 متر علما بأنها مبدلة الموضع على طول مسارها. احسب محاثة التتابع الموجب لكل موصل / كم

(الجواب: 1.3 ملي هنري)

2. خط نقل ثلاثي الطور 50 هرتز طوله 16 كم وله موصلات مصمتة ذات قطر 2.5 سم مع متوسط تباعد هندسي مقداره 4.2 سم. يمكن اعتبار الخط على أنه مبدل الموضع. احسب فولتية نهاية الارسال عندما ينقل قدرة لحمل مقداره MVA100 ذي عامل قدرة متأخر مقداره صفر وعند فولتية 132 كيلو فولت. إهمل مقاومة الخط ومتسعته.

(الجواب : 136.4 كيلو فولت)

3. خط نقل ثلاثي الطور 50-هرتز له موصلات تتألف من 12 جديلة من الألمنيوم ملفوفة حول لب فولاذي ذي سبع جدائل. كل جديلة ألمنيوم أو فولاذية لها قطر مقداره 0.28 سم. متوسط التباعد الهندسي بين موصلات الأطوار هو 6.1 متر. عامل الخط وكأنه مبدل الموضع. اعتبر أن الموصلية الكهربائية للفولاذ هي 16 % من تلك للألنيوم وأننا استعملنا طبقات مجدولة. الجداول تبين أن المفاعلة الحثية لكل موصل من هذا الخط هي 0.525 أوم/ كيلومتر.

احسب نسبة الخطأ المئوية التي يمكن أن تنشأ فيما لو حسبنا هذه المحاثة بدلاً من أن نفترض أن جدائل الفولاذ لا تحمل أي تيار.

(الجواب : -17%)

4. خط نقل قدرة أحادي الطور ذي تردد 50 هرتز له موصلات تبتعد عن بعضها بمسافة 3.05 متر ولها الارتفاع نفسه عن الأرض. موصلا دائرة هاتف يبتعدان عن بعضهما بمسافة 0.61 متر ولكليهما الارتفاع نفسه عن الأرض ولكنهما يقعان تحت خط القدرة ويبعدان عنه بمسافة 3.05 متر. المسافة الأفقية بين المستوي الوسطي لخط القدرة والمستوى الوسطى لخط الهاتف هي 6.1 متر. إذا كان الخطان يسيران على التوازي كيلومتر واحد فاحسب فولتية التردد 50 هرتز المحتثة في دائرة الهاتف عندما يحمل خط القدرة تيارا مقد اره 500 أمبير.

(الجواب: 5.1 فولت)

5. ملف لولبي ملفوف على اطار طويل مربع المقطع ولا يحتوي على مادة مغناطيسية. تم ثنيه بشكل حلقي. بحيث أصبح نصفا قطرية الداخلي والخارجي r_1 و r_2 أمررنا كيبلاً مستقيماً نحيفاً ذا طول محدود على طول المحور الحلقي وبزوايا قائمة الى مستوية. برهن على أن المحاثة المشتركة بين الكيبل والملف اللولبي هي

$$M = \mu_o n \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{2} ln \frac{r_2}{r_1} H$$

حيث أن n = متوسط عدد اللفات / متر

كذلك أحسب ذروة الـ ق .د .ك . المحتثة في الملف إذا كان : متر $r_1 = 0.09$ و

$r_2 = 0.11$متر و n=1000 والتيار الجيبي في الكيبل له قيمة ذروة مقدارها 1000أمبير عند 50 هرتز.

(الجواب: 0.1575 فولت)

(هذا الترتيب للملف الحلقي حول موصل يعرف بملف روكوسكي Rogowski coil ويتم استعماله أحيانا لقياس التيار)

الفصل الرابع

1. استخرج التعبير الرياضي للسعة / وحد ة طول لخط نقل ذي سلكين يرتفع بمسافة مقدارها h فوق أرض ذات توصيل تام. الموصلات ذات نصف قطر مقداره r متر يبعد بعضها عن بعض مسافة مقدارها d متر قرون وذات بعد متساوٍ عن الأرض أفرض أن r يقل كثيراً عن d و h .

2. سلك اسطواني مستقيم طويل ذو نصف قطر r وضع في وسط ذي سماحية ϵ موازيا لصفيحة. موصلة في المستوى الافقي محور السلك يبعد مسافة مقدارها h فوق الصفيحة. اشتق العلاقة الرياضية للمتسعة / وحدة طول بين السلك والمستوى . اذكر أية فرضية عملتها.
فرق الجهد بين السلك والصفيحة هو 5 كيلوفولت مع0.3= r سنتمتر و 12 =h سنتمتر. احسب المتسعة / وحدة طول.
(الجواب:
، 0.0127 مايكروفاراد)

3. احسب فولتية التمزق الحرجة بين الموصلات لخط احادي الطور له التفاصيل التالية: قطر الموصل 1.35 سم ، المباعدة بين الموصلات 4.25 متر، معامل الخشونة 0.83 = M درجة الحرارة .°20 مئوية، قراءة مقياس الضغط الجوي760 ملم زئبق (torr) . تدرج فولية التمزيق الحرجة للهواء = 21.1 كيلوفولت (ج . م . ت) / سم عند 25° مئوية و 760ملمتر زئبق .

(الجواب: 154.6 كيلو فولت)

4. إذا كانت الفولتية الحرجة بين موصلي خط احادي الطور تساوي 120 كيلوفولت لموصلات ذات قطر 1.27 سم ويبعد بعضها عن بعض مسافة 1.22 متر. فأوجد الفولتية الحرجة لموصلات ذ ات قطر 1.09 سم ويبعد بعضها عن بعض مسافة 2.44متر إذا بقيت كل الظروف الأخرى دون تغيير**.**

(الجواب: 120 كيلو فولت)

5. استنتج من المبادئ الأولية وباستعمال التقريبات المناسبة للإجهاد الكهربائي الأعظم لخط نقل علوي معلق ثلاثي الطور 132 كيلوفولت له موصل واحد / طور. كل الموصلات ذات ارتفاع متساوي البعد عن الارض ومتماثلة الموضع حول الطور الوسطي. أنصاف اقطار الموصلات هي 1.41 سم والمسافة بين الاطوار المتجاورة هي 3 أمتار. (أ) حدد بصورة مختصرة عوامل تكوين الهالة وبين ملاحظاتك حول احتمال حدوث الهالة أو لا في هذا الخط تحت ظروف التشغيل الاعتيادية.
(ب) جد المحاثة والسعة للتتابع الموجب لكل وحدة طول لخط النقل هذا.

(الجواب: (أ) 13.67×10^{-3} فولت/ سم، (ب) 1.17×10^{-6} هنري/متر، 9.89×10^{-12}فاراد/متر)

الفصل الخامس

1. سلسلة عازل معلقة تتألف من أربع وحدات متشابهة، السعة الذاتية لكل منها هي أربعة أضعاف السعة بين كل مسمار رابط والأرض. إذا كان الموصل يحمل فولتية 76 كيلوفولت مقاسة نسبة إلى الأرض، فجد الفولتية عبر كل وحدة وكفاءة السلسلة.

(الجواب: 11، 13.8 ، 21.2 كيلو فولت ، 60.8%)

2. حدد توزيع الفولتية وكفاءة السلسلة لعازل معلق ذي ثلاث وحدات إذا كانت سعة المسامير الرابطة الى الأرضي والى الخط هي على التوالي 15% ، 5% من السعة الذ اتية لكل وحدة.

(الجواب: 30.2، 31.1 ، 38.7 ، 86.3%)

3. كل وحدة في سلسلة ذات ثلاث وحدات قرصية لها سعة ذاتية C والسعة من برج إلى نقطة ربط المسمار والغطاء هي 0.2 C. السعة من حلقة التدريج الى نقطة الربط السفلى هي 0.4 C وإلى نقطة الربط التي تلي السفلى هي 0.1 C ، احسب كفاءة السلسلة .

(الجواب: 100 %)

4. السعة بين كل مسمار رابط والأرضي لسلسلة عازل معلقة ذات ثلاث وحدات هي 0.2 من سعة كل وحدة. حدد كمية الزيادة في سعة الوحدة السفلى لكي نحصل على كفاءة سلسلة مقدارها 90% علماً أن الوحدتين الاخريين تم إبقائهما بدون تغيير.

(الجواب: 26.5%)

5. سلسلة عازل تحتوي على ثلاث وحدات متماثلة يمكن أن تكون لها فولتية متساوية عبر كل وحدة عن طريق اختيار سعة مناسبة بين كل نقطة مسمار وغطاء وحلقة التدريج. اذا كانت الوحدة طرف البرج لها سعة مقدارها وحدة واحدة والسعة من نقطة المسمار والغطاء الى البرج هي 0.2 من الوحدة فاحسب السعة النسبية العلوية والسفلية لنقطة المسمار والغطاء الى حلقة التدريج.

(الجواب: 0.4 ، 0.1)

6. خط المنيوم ذو لب فولاذي له مساحة نحاس مكافئة مقدارها 1.15 سم^2 , وله مقاومة مقدارها 0.158 اوم / كم عند 20 مئوية . اوجد موصلية النحاس المسحوب الصلد بنسبة مئوية من النحاس اللدن القياسي ذي الموصلية 100% علما أن الأخير له مقاومية مقدارها 58/1 اوم-ملم^2 / متر عند 20° مئوية.

(الجواب 96.4 %)

7. احسب المعامل التقديري للمرونة والمعامل التقديري للتمدد الخطي لموصل ألمنيوم ذي لب فولاذي 1.15 سم^2 وقطر 0.28/30/7 سنتمتر استعمل البيانات الخاصة بهذه المادة المعطاة في هذا الفصل.

(الجواب : 18.42×10^{-6} لكل درجة سيليزية ، 9.18×10^{18}نيوتن/ م^2)

الفصل السادس

1. موصل خط علوي معلق بوساطة برجين على طرفي ممر مائيٍ ارتفاع البرجين هو 29 مترو 33.6 متر على التوالي فوق مستوى الماء لهما بون افقي مقداره 336 متر. إذا كان الموصل يزن 8.33 نيوتن / متر وشده يجب أن لا يتجاوز 3.34×10^4 نيوتن فاحسب (أ) حيز الخلوص بين أوطأ نقطة للموصل والماء (ب) المسافة الافقية لهذه النقطة من البرج المنخفضْ.

(الجواب:(أ) 27.4 متر،(ب) 113متر)

2. حدد مقدار التدلي لبون طوله 183 متراً لموصل فولاذي مغلفن له 37 جديلة كل منها ذات قطر 0.259 سم. وزن الموصل هو 7.15 نيوتن / م وقوة القطع هي 67700 نيوتن.. تحميل الريح هو 382 نيوتن / م^2 من المساحة المعرضة (المغطاة بالجليد). أفرض أن وزن الجليد هو 8920 نيوتن / م^2 والسمك العرضي للثلج هو 0.96 سم.

(الجواب: 3.2متر)

3. موصلات خط علوي معلق لها قطر 1.15 سم وذات بون 122 متر. أحسب التدلي عند منتصف -البون عندما يكون للموصلات تحميل ثلج بسمك عرضي 0.96 سم وتكون معرضة لضغط ريح أفقي مقداره 382 نيوتن / م^2 . شد الموصل المسموح به هو 3.56×10^4 نيوتن. إذا كان طول سلاسل عوازل التعليق هو 1.22 متر وحيز الخلوص الأدنى من برج التثبيت هو 0.458 م فأحسب أقل مسافة ممكنة يمكن عندها تعليق سلسلة العازل بذراعها المستعرضة. وزن الموصل هو 5.83 نيوتن / م . وزن الثلج هو 8920 نيوتن / م .

(الجواب: 0.865 ، 1.32متر)

4. خمن مقدار التدلي بالمتر لموصل نحاسي في الهواء الساكن عند درجة حرارة 72° فهرنهايت. بحيث أنه عند انخفاض درجة الحرارة إلى 22° فهرنهايت وتحميل الريح يكون 11.2 نيوتن / م وتحميل الثلج يكون 5.27 نيوتن / م فأن الإجهاد في الموصل سوف لا يتجاوز 200 17 نيوتن / سم^2. مساحة مقطع الموصل هي 0.628 سم^2 وزن الموصل لكل متر= 5.6 نيوتن. معامل يونك 12.4×10^6 = (E) نيوتن / سم^2. معامل التمدد الخطي / درجة فهرنهايت = 9.22×10^{-6} .

(الجواب: 2.28متر)

5. خط علوي معلق مثبت على منحدر ذي ميل 1 لكل 0.45 ، ارتفاع أعمدة التثبيت هو 7.62 متر وطول البون المقاس افقياً هو 137 متر . إذا كانت مساحة المقطع المكافئة للموصل هي 0.893 سم والاجتهاد الأقصى المسموح به هو 6900 نيوتن / سم^2 فاحسب التدلي الأقصى نسبة إلى عمود التثبيت الأوطأ. أفرض أن للموصل تحميل ثلج يزن 5.1 نيوتن / م وضغط الريح هو 382 نيوتن / م^2.

(الجواب: 1.2متر)

6. موصلات الألمنيوم ذات القلب الفولاذي لحمل علوي معلق لها قطر كلي 1.95 سم محمولة بواسطة سلاسل عوازل معلقة ذات طول 1.43 متر. إحسب ارتفاع أوطأ ذراع مستعرضة فوق مستوى الأرض إذا كان حيز الخلوص الأدنى بين الموصل والأرض هو 7.62 متر عندما يكون هناك حمل ثلج ذو سمك 0.96 سم وضغط ريح أفقي مقداره 382 نيوتن / م^2 وطول البون هو 244 متراً. الشد المسموح هو 3.56×10^4 نيوتن والموصل يزن 8.31 نيوتن / م ووزن الثلج هو 8920 نيوتن/ م^3.

(الجواب: 12.5متر)

الفصل السابع

1. محول أحادي الطورعدد لفات ملفه الابتدائي 480 وملفه الثانوي 90. معدل مسار الفيض في لبه الحديد 180 سم والمفاصل فيه تكون مكافئة لفجوة هوائية طولها 0.1 ملم. فإذا كانت أقصى قيمة لكثافة الفيض هي 1.1 تيسلا عند تسليط فولتية مقدارها 2200 فولت بتردد 50 هرتزعلى الملف الأبتدائي فأحسب:

ا) مساحة مقطع اللب

ب) فولتية الثانوي عند اللاحمل

ج) تيار الأبتدائي وعامل القدرة عند اللاحمل

أفرض أن الأمبير لفات / متر إلى 1.1 تيسلاً تكون 400، وفقد الحديد المناظرهو 1.77 واط / كغم عند 50 هرتز وكثافة الحديد هي 7.8.

(الجواب: 187 سم، 412.5 فولت، 1.21 أمبير ، 0.174)

2. محول أحادي الطور مقنناته: 10 كيلو فولت أمبير وفولتيته 100/230 فولت. عندما تكون ملفات الثانوي له مفتوحة الدائرة وملفات الأبتدائي مجهزة بفولتية أسمية (230 فولت) يكون تيار الدخل 2.6 أمبير عند عامل قدرة 0.3. وعندما يكون الثانوي مقصور الدائرة فأن فولتية مقدارها 18 فولت على الأبتدائي تسبب مرور تيار حمل كلي في الثانوي والقدرة الداخلة للأبتدائي في هذه الحالة تكون 240 واط.أحسب:

أ) الكفاءة عند حمل كلي له عامل قدرة مقداره واحد.

ب) الحمل الذي تحدث عنده القيمة العظمى للكفاءة.

ج) القيمة العظمى للكفاءة.

(الجواب:(أ) 95.97% ، (ب) 8.65 كيلوفوات أمبير ، 96 %)

3. محولان ثلاثيا الطور متماثلان ربطاهما نجمي / نجمي. أحدهما مربوط عند جهة المولد والآخر عند جهة المحطة الثانوية لكيبل أرضي 33 كيلو فولت مقاومة كل موصل من الكيبل هي 7.17 أوم ومفاعلته الحثية هي 2 أوم. كل محول 33/6.6 كيلو فولت له مقاومة مكافئة مقدارها 0.04 أوم لكل طور ومفاعلة تسربية مقدارها 0.4 أوم لكل طور منسوبتان إلى جهة الفولتية الواطئة.

إذا تم تزويد 5000 كيلوواط بفولتية 6 كيلو فولت وعامل قدرة متأخر 0.8 على جهة الفولتية المنخفضة لمحول المحطة الثانوية؛ فأحسب الفولتية على جهة الفولتية المنخفضة للمحول عند محطة التوليد مبينا الأفتراضات التي تم فرضها.

(الجواب: 6880 فولت)

4. ثلاث محولات أحادية الطور سعة كل منها 50 كيلو فولت أمبير، 240/2400 فولت مربوطة بشكل نجمي- مثلثي لتؤلف خازن محولات ثلاثي الطور قدرته 150 كيلو فوات أمبير لغرض تخفيض الفولتية عند جهة الحمل يغذى بمغذي ممانعته 0.1+0.15 j أوم/ طور وفولتية الخط عند طرف الأرسال للمغذي هي 4160 فولت وعلى جهة الثانويات تغذي المحولات حملا متوازناً ثلاثي الطور خلال معذ ممانعته بالأوم لكل طور 0.0020+0.0005 j. قراءات فحص الدائرة القصيرة لكل محول أحادي الطورهي : 48 فولت ، 20.8 أمبير و 617 واط مقاسة على جهة الفولتية العالية (H.V) . جد فولتية الخط عند الحمل عندما يسحب الحمل تياراً مقتناً من المحولات بعامل قدرة متأخر 0.8.

(الجواب :0 232.9 فولت)

5. محول ثلاثي الطور ربط بشكل نجمي على كلا جانبيه الأبتدائي والثانوي يجهز حملاً خلال خط نقل المقاومة المكافئة للحمل إلى المحايد مقدارها 400 اوم والمفاعلة 600 أوم. وكل موصل من موصلات الخط النقل له مقاومة 4 أوم ومفاعلة 6 أوم. ملف الثانوي للمحول له عدد من اللفات تعادل ثلاثة أمثال اللفات التي في طور الابتدائي أما المحول فله مقاومة 0.5 أوم / طور ومفاعلة تسربية 2.5 أوم / طور. للابتدائي مقاومة 5 أوم / طور ومفاعلة تسربية للثانوي 25 أوم / طور . فإذا كانت فولتية الخط للابتدائي 11 كيلو فولت فأحسب فولتية الطرف في الملف الثانوي.

(الجواب: 31.2 كيلو فولت)

6. محولان ثلاثيا الطور A و B ربط كلاهما بشكل نجمي / نجمي وفولتيتاهما 440/6600 فولت. قدرة المحول Aهي 250 كيلو فولت أمبير وقدرة المحول B هي 500 كيلو فولت أمبير لهما ممانعة / طور منسوبة الى جهة الثانوي كالاتي :

للمحول A :

R=0.008 أوم و X=0.035 أوم .

للمحول B :

R=0.003 أوم و X=0.019 أوم .

احسب كيف يقتسم هذان المحولان حملاً مقداره 600 كيلو فولت أمبير بعامل قدرة متأخر 0.8 إذا كانت فولتية الحمل 440 فولت. احسب أيضاً الكيلو فولت أمبير وعامل القدرة لكل محول.

(الجواب :208.2 و 392.2 kVAلكل محول ، عوامل القدرة 0.82 , 0.785)

7. محولان ثلاثيا الطور ربط كل منهما نجمي / نجمي مربوطان على التوازي وجهزا بفولتية على جهة الابتدائي قدرها 11000 فولت. عدد اللفات لكل طور لثانوي المحول الأول تعادل ثلاثة أمثال عدد لفات الابتدائي لكل طور وعدد اللفات لكل طور لثانوي المحول الثاني تعادل 3.1 عدد لفات

الابتدائي لكل طور. مفاعلة كل محول هي 100 أوم / طور منسوبة إلى الثانوي. أما المقاومة فيمكن إهمالها. يجهز هذا المحولان حملا نجمي الربط مقدار 1000+500 j أوم لكل طور.

إحسب فولتية الطرف على الثانوي وزاوية طوره بالنسبة إلى القوى الدافعة الكهربائية المحتثة في الثانوي.

(الجواب: 19010 فولت ، 15 درجة)

8. محولان ثلاثيا الطور A , B لهما نسب تحويل متساوية . الأبتدائي والثانوي كلاهما مربوط على شكل نجمي ويعملان على التوازي لتجهيز حمل معين. التيار الابتدائي للمحول A هو 100 أمبير وعامل قدرته متأخر 0.7 . إحسب التيار الابتدائي وعامل قدرة المحول B. فولتية الخط للابتدائي هي 10000 وقيم المقاومة الطورية والمفاعلة التسربية الطورية لكلا المحولين منسوبة جميعها إلى الابتدائي كالآتي: $R_A = 0.5\,\Omega$, $X_A = 1.5\Omega$, $R_B = 0.6\Omega$ وكذلك $X_B = 1.8\,\Omega$. كلا المحولين له عدد لفات لكل طور فى الثانوي تساوي ثلاثة أمثال تلك التي للابتدائي. احسب تيار الحمل وعامل القدرة والمقاومة والمفاعلة لكل طور المكافئتين للحمل المربوط بشكل نجمي.

(الجواب : 83.3 أمبير ، 0.7 متأخر، 61.1 أمبير، 0.71 متأخر، 188 Ω،192 Ω)

9. محولان ثلاثيا الطور لهما نسبتا لفات متساوية. يجهزان على التوازي حمل مقد اره MW4 عند عامل قدرة متاخر 0.8. والمعلومات عن المحولين كالاتي:

	المقاومة بنسبة الوحدة	المفاعلة بنسبة الوحدة
المحول A	0.01	0.05
المحول B	0.015	0.06

جد القدرة المركبة وعامل القدرة لكل محول.

الجواب:

0.818 ، 0.787 ، (1845.4- j1307.8 kVA) ،(2154.6-j 1692.2 kVA

10. خازن محولات مثلثي / نجمي 0.44/6.6 كيلو فولت. متألف من ثلاث وحدات أحادية الطور متماثلة يجهز حملاً مقداره 120 كيلو واط بعامل قدرة مقداره واحد بين الخط الأول L_1 والمحايد وكذلك حملاً متوازناً مقداره 500 كيلو فولت أمبير بعامل قدرة متأخر 0.8. جد قيمة التيار في كل ملف ابتدائي وكل خط داخل وعلم هذه القيم على مخطط مناسب للربط تجاهل الهبوط الداخلي وتيار اللاحمل. تتابع الأطوار هو L_1,L_2,L_3 (L_1 ثم L_2 ثم L_3).

(الجواب: تيارات الابتدائي هي: 41.2 ، 25.3 ، 25.3 أمبير).
(تيارات الخطوط هي: 53 ، 62 ، 44 أمبير)

11.محولان ثلاثيا الطور A , B نجميا الربط على جهتي الابتدائي والثانوي . كل منهما له عدد لفات في الثانوي تساوي ثلاثة امثال تلك التي للابتدائي. ربطا على التوازي لتجهيز حمل مثلثي الربط مقاومته 270 أوم / طور ومفاعلته الحثية 135 أوم / طور. وكانت فولتية الابتدائي 11كيلو فولت.
احسب تيار الثانوي للمحول A وعلاقته الطورية بتيار أحد أطوار الحمل. تفاصيل المحولات كالاتي:

الملف	المقاومة (أوم)	المقاومة التسريبية (أوم)
الابتدائي للمحول A	0.4	1.0
الابتدائي للمحول B	0.4	0.8
الثانوي للمحول A	5.4	7.2
الثانوي للمحول B	3.6	10.8

(الجواب: 90 أمبير يتأخر بزاوية مقدارها 25.54 درجة).

12. محولان ثلاثيا الطور، ربطاهما نجمي / نجمي. المفاعلة التسربية لكل منها 0.05 اوم / طور منسوبة الى جهة الثانوي. عندما يغذى ملفيهما الابتدائي على التوازي من مصدر بفولتية مقننة طبيعية تكون فولتية الطور المناظرة لملفيهما الثانوي في حالة الدائرة المفتوحة هما 230 فولت و232 فولت على التعاقب. ربط ثانوياهما على التوازي إلى حمل نجمي الربط متوازن له ممانعة مقدارها 0.5 أوم / طور وعامل قدرة متأخر 0.9. أهمل تيار المغنطة والمفاقيد: جميعاً؛
أحسب:
(أ) فولتية الطرف للحمل.
(ب) الكيلو فولت أمبير المجهزة من قبل المحول الذي فولتية الدائرة المفتوحة له هي 230 فولت.

(الجواب: 226 فولت، 145 كيلو فوات أمبير)

13. محول ثلاثي الملف ملفاته مقننة كالاتي:

الأبتدائي نجمي الربط 22 كيلو فولت 200 MVA
الثانوي نجمي الربط 275 كيلو فولت 200 MVA
الثالثي مثلثي الربط 3.3 كيلو فولت
فحوصات الدائرة القصيرة أعطت قيم الممانعات التسربية التالية وظهر أيضا ان المقاومات صغيرة بحيث يمكن إهمالها.
بأجراء القياسات على دائرة الأبتدائي مع كون :
(أ) الثانوي مقصور الدائرة والثالثي مفتوحاً: كانت المفاعلة التسربية 0.24 أوم
(ب) الثالثي مقصور الدائرة والثانوي مفتوحاً: كانت المفاعلة التسربية 0.31 أوم
وباجراء القياسات في دائرة الثانوي مع جعل دائرة الابتدائي مفتوحة ودائرة الثالثي مقصورة كانت المفاعلة التسربية 54.3 أوم.
إحسب ممانعات الدائرة المكافئة بنسبة الوحدة (إهمل تيار اللاحمل) منسوبة الى الـ MVA المقننة وفولتية الملف الابتدائي.

(الجواب: j0.042، j 0.057، وكذ لك j 0.086 بنسبة الوحدة)

الفصل الثامن

1. كيبل ثلاثي الطور ثلاثي اللب محزوم له متسعة بين الموصلات الثلاثة المربوطة سوية مع الغلاف هي 0.6 مايكروفاراد . المتسعة بين أحد المو صلات والموصلين الآخرين المربوطين الى الغلاف هي 0.7 مايكروفاراد. احسب تيار الشحن المجهز إلى كل موصل عند ربط الكيبل إلى مصدر 6600 فولت ثلاثي الطور ذي تردد 50 هرتز.

(الجواب: 1.14 أمبير)

2. كيبل أحادي الموصل ذو عازل متجانس يتألف من موصل نصف قطره r سم ونصف قطر الغلاف R سم . أريد استعمال غلاف داخلي مفرد ذي نصف قطر x سم . تصاعد الفولتية عند سطح الموصل هو E_1 والذي عند سطح الغلاف الداخلي الأقرب الى الغلاف الخارجي هو E_2 . جد التعبير الرياضي الذي يمكن به تحديد قيمة x التي تمكن الكيبل من تحمل أعلى فولتية بين اللب والغلاف عندما تكون E_1 أكبر من E_2 .

الجواب : $$\frac{r\,E_1}{x} + E_2 ln\frac{R}{x} = E_2$$

3. كيبل محزوم ذو ثلاث موصلات ثلاثي الطور مربوط إلى مصدر 11000 فولت ، 50 هرتز. كل موصل يأخذ تيار شحن 2 أمبير . متسعة الكيبل Cs هي 0.4 مايكروفاراد . إحسب زاوية إزاحة

الطور بين تيار الشحن الداخل للموصل 1 والفولتية بين الموصلين 2 و 3 . احسب كذلك مقادير وعلاقات الطور لمركبات التيار التي ينكون منها تيار الشحن الكلي للموصل 1.

(الجواب: 180^{o} ، $0.8 \angle 0^{\circ}$ أمبير ، $0.69 \angle -30^{\circ}$ أمبير ، $0.69 \angle 30^{\circ}$ أمبير)

4. كيبل أحادي الطور متحد المركز طوله 2.4 كيلومتر مربوط إلى قضبان توزيع 50 هرتز 6.6 كيلو فولت. قطر الموصل الداخلي 1.25 سنتمتر والسمك العرضي للعازل0.8 سنتمتر. السماحية النسبية للعازل 3.5. جد القدرة المصروفة لشحن الكيبل بالكيلو فولت أمبير.

(الجواب: 7.75 كيلو فولت أمبير)

5. كيبل أحادي الموصل تم مده في الأرض قطر الموصل 2.5 سنتمتر وسمك العازل للموصل 4 سنتمتر والمقاومية الحرارية للعازل 5 أوم- متر حراري ومقاومة الموصل الكهربائية 100 مايكرو أوم- متر والتيار المقنن للموصل 500 أمبير. المطلوب تحديد المقاومة الحرارية بين الغلاف وسطح الأرض إذا كان فرق درجة الحرارة بين الموصل وسطح الأرض هو 50 درجة مئوية عندما يحمل الموصل التيار المقنن.

(الجواب : 0.855 أوم حراري)

6. كيبل محزوم ذو ثلاث موصلات ثلاثي الطور 11000 فولت ، 50 هرتز. له متسعة بين أي موصل والغلاف مقدارها 0.5 مايكروفاراد والمتسعة بين موصل وآخر 0.3 مايكروفاراد . احسب القيمة الآنية للتيار بين الغلاف وأي موصل تختاره في اللحظة التي يكون تيار الشحن المحمول بذلك الموصل عند قيمته القصوى.

(الجواب: 1.41 أمبير)

7. احسب التيار اللازم لشحن كيبل محزوم ذو ثلاث موصلات ثلاثي الطور طوله 32 كيلومتر عند ربطه بمصدر ثلاثي الطور 20 كيلو فولت 50 هيرتز بين الخطوط . المتسعة بين موصلين حين يكون الموصل الثالث والغلاف معزولين هي 0.00625 مايكروفاراد / كيلومتر .
إذا استعمل هذا الكيبل لتجهيز مصنع يستهلك قدرة كلية مقدارها 857 كيلو فولت أمبير بعامل قدرة متأخر 0.7 من الطرف البعيد للكيبل ؛ فاحسب عامل القدرة والتيار عند طرف الارسال للكيبل . إهمل مفاقيد الكيبل والمحاثة.

(الجواب: 14.5 أمبير ، 0.98 ، 17.8 أمبير)

1. محطة توليد تقع في المنطقة A تحتوي على ستة مجاميع لمولد مع محول متماثلة. كل مولد مقنن عند 11كيلو فولت 120 ميجاواط وكذ لك $X_1^{`} = X_2 = 18\%$ (عند التقنين) . المحولات مقننة عند 132/11 كيلو فولت ، 150 ميجافولت أمبير . مربوطة بشكل مثلثي /نجمي مؤرض مباشرة مع تأريض نقاط الربط النجمية جميعا . وكذلك (X = 12% عند التقنين) . وطول الخط AB الذي فولتيته 132 ك .ف هو 96 كم ومفاعلته X_1 =0.44 أوم / طور- كم . أفرض أن المنظومة تعمل في حالة اللاحمل وبفولتية مقننة واهمل مقاومة المنظومة وتتطلب المرحلات الممانعية الصرفة عند النقطة A ؛ 3% من الفولتية الأسمية كقيمة دنيا لأشتغالها بصورة مرضية . لعطل ثلاثي الطور احسب أقل مسافة للعطل من المرحل لكي يعمل المرحل بشكل مرضي في حالة اشتغال (أ) مجموعة واحدة . (ب) ستة مجموعات من المولد- المحول.

(الجواب : 1.54 كم, 0.413 كم)

2. في السؤال رقم 1 أعلاه ؛ إذا اشتغلت المجموعات الست في محطة التوليد عند A. وكان المرحل المسافي للمرحلة 1 عند A هو مرحل مسامحي (مستقطب) له زاوية مميزة مقدارها 90° ومنظم بصورة صحيحة ليصل إلى 80% من الخط AB. ربطت الآن محطة توليد صغيرة لهما ممانعة مصدر 158.6 اوم/طور عند 132كيلو فولت في نقطة منتصف الخط AB. جد موقع العطل الثلاثي الطور الذ ي عنده سوف يبدا اشتغال المرحل واحسب بعدها نقص الوصول للمرحل .

افرض أن ق . د . ك للمصدر تساوي جميعاً الفولتية المقننة وتكون جميعها فى الطور نفسه.

(الجواب : 5.42%)

3.في السؤال رقم 2 أعلاه؛ تم تنظيم مرحل المرحلة 2 عند A بصورة صحيحة ليصل إلى 50% نحو الخط BC . الذي طوله 64 كم. الآن عندما لا تكون هناك تغذية داخلة في B وإذا ربطت محطة توليد مشابهة لتلك التي عند A. في النقطة B واشتغلت المجموعات الاثنتي عشرة جميعها؛ فاحسب نقص الوصول للمرحل عند A ولا توجد تغذية داخلة في منتصف AB .

(الجواب : 22.3%)

4. في منظومة حماية مسامحية لعطل طور معوضة يجهز كل مرحل بالفرق بين فولتية طورين اثنين والـفرق المنـاظر بين تياري الطورين ويعني هذا ان المرحل a يقيس الكمية:

$$(V_a - V_b)/(I_a - I_b)$$

أهمل ممانعة المصدر، بين أنه لعطل طور- إلى – طور بين الطورين b-c تكون الممانعات المقاسة بواسطة المرحلات a , b , c هي: $Z_1 = 2\angle -60°$، Z_1 وكذ لك $Z_1 2\angle 60°$= على التوالي

حيث $Z_1 = R_1 + jX_1$ هي ممانعة التتابع الموجب للخط من المرحل الى العطل . وإذا أمكن الآن اهمال مقاومة الخط فبين (أ) إنه إذا كان كل مرحل له تنظيم X_1 وزاوية مميزة مقدارها 90° فإن المرحل b سوف يشتغل فقط وكذلك (ب) إذا كانت الزوايا المميزة للمرحلات هي 30° لكل منها وكان التنظيم بحيث أن اشتغال المرحل b يكون على الحافة فان المرحل a يكون معرضاً للاشتغال أيضاً .

الفصل الثاني عشر

في جميع الأسئلة التالية على القارئ أن يفترض، مالم ينص على خلاف ذلك، أن جميع مصادر الـ ق.د.ك. تكون متوازنة وتكون مثارة بحيث نعطي الماكنة الفولتية المقننة ومتطابقة في الطور؛ وأن المقاومة يمكن اهمالها وأن جميع المفاعلات المحسوبة بنسبة الوحدة للماكنة تكون معتمدة على القيمة المقننة لها ، وأن تتابع الأطوار هو abc .

1. ثلاثة مولدات تزامنية 6.6 كيلوفولت ذات قيم مقننة 2000 و 5000 و 8000 كيلو فولت أمبير وذات مفاعلات بنسبة الوحدة 0.08 و 0.12 و 0.16 على التعاقب ؛ مربوطة إلى قضيب توزيع مشترك يصل كيبل مغذ ذو مفاعلة 0.125 أوم بين قضيب التوزيع ومحطة فرعية احسب مستوى العطل بالـ MVA إذا حدث عطل متماثل ثلاثي الطور عند المحطة الفرعية.

(الجواب: 87.2 MVA)

2. محول ثلاثي الطور ذو ربط نجمي / نجمي يغذي حملا نجمي الربط مقداره 400+ 600 j أوم / طور خلال خط نقل كل موصل من موصلاته له ممانعة 4 + 6 j اوم . الملف الثانوي للمحول له عدد لفات تساوي ثلاثة اضعاف عدد اللفات في الملف الابتدائي.

مفاعلة ومقاومة الابتدائي: R = 0.5، X = 2.5 أوم/ طور

مفاعلة ومقاومة الثانوي : R = 5.0، X = 25.0 أوم/ طور

يتغذى المحول من مولد ذي قيم مقننة 1500 كيلو فولت أمبير و 11 كيلو فولت ومفاعلة عابرة 0.2 بنسبة الوحدة. جد فولتية الطرف الثانوي للمحول عندما تكون فولتية الطرف الابتدائي تساوي 11 كيلوفولت .

جد تيار المولد إذا حدثت دائرة قصيرة مباشرة على كل الاطوار عند منتصف الخط. الـ ق.د.ك. خلف المفاعلة العابرة للمولد يمكن اعتبارها ثابتة.

(الجواب: 31 كيلو فولت، 340 أمبير)

ثلاثة مولدات تزامنية نجمية الربط؛ ربط كل منها على التوالي مع ملف مفاعل متشابه محدد للتيار إلى قضيب توزيع مشترك. كل من المولدات له سعة مقننة مقدارها 10 ميجا فولت أمبير ومفاعلة دون العابرة لكل طور 0.06 بنسبة الوحدة .كذلك تم تجهيز محولتين 33/11 كيلو فولت لهم قيم مقننة: 15

ميكافولت أمبير ومفاعلة 0.03 بنسبة الوحدة و10 ميكا فولت أمبير ومفاعلة 0.02 بنسبة الوحدة على التعاقب. هاتان المحولتان ربطتا على التوازي إلى قضيب التوزيع لتغذيا خط نقل ذا ممانعة مقدارها 0.2+0.7 j أوم/ كم عند محطة فرعية تبعد 10 كم عن محطة التوليد حيث يوجد محول 25 ميجا فولت أمبير 11/33 كيلو فولت وذو مفاعلة 0.06 بنسبة الوحدة . احسب قيمة مفاعلة الملف المحدد للتيار لكل مولد إذا إشتُرِط أن المولد لا يجب تحميله بأكثر من $2\frac{1}{3}$ من تيار الحمل الكامل عند حدوث دائرة قصيرة متماثلة على قضيب التوزيع 11 كيلو فولت في المحطة الفرعية.

(الجواب: 0.837 أوم)

4. محطة قدرة تحتوي على ثلاثة مولدات تزامنية 50 هيرتز ثلاثية الطور سعة كل منها 200 ميجا فولت امبير و ذو مفاعلة تزامنية 0.9 بنسبة الوحدة. هذه المكائن الثلاث تشتغل بتحميل متساوٍ وتم ربط كل منها إلى محول 132/11 كيلوفولت ذي سعة 200 ميجا فولت أمبير ومفاعلته 0.09 بنسبة الوحدة. قضيب التوزيع 132 كيلوفولت للمحطة يغذي خط نقل قصير 132 كيلوفولت له مقاومة 0.5 اوم ومحاثة 8 ملي هنري لكل موصل طور. مقاومات المكائن والمحول يمكن اهمالها. كذلك تم ربط حمل 400 ميجاواط ذو عامل قدرة متأخر مقداره 0.8 يجهز من قبل خط النقل القصير. إذا اخذنا إحدى فولتيات الطور عند طرف الحمل من الخط مرجعا ذا قيمة 1 بنسبة الوحدة وزاوية $0°$ فاحسب الـ ق.د.ك. للطور المناظر في أي من المولدات. وإذا حدثت دائرة قصيرة ثلاثية الطور عند طرف الحمل من خط النقل فاحسب تيار العطل للحالة المستقرة عند هذه النقطة.

(الجواب : 1.703 بنسبة الوحدة والزاوية 24 درجة ، تيار العطل = 4130 أمبير)

5 . ثلاثة مولدات تزامنية 11 كيلوفولت كل منها مقنن عند 000 10 كيلووات أمبير وذات مقاومة 0.02 ومفاعلة دون العابرة 0.15 بنسبة الوحدة ربطت قضبان التوزيع الخاصة بها الى ملفات مفاعلة ثلاثية الطور مربوطة شبكياً و كل ملف منها له مقاومة 0.015 بنسبة الوحدة ومفاعلة 0.09 بنسبة الوحدة لكل طور على تقنين 10000 كيلو فوات أمبير. ربط محول 20000 كيلوفولت أمبير ذو مقاومة 0.01 بنسبة الوحدة ومفاعلة 0.10 بنسبة الوحدة إلى قضيب توزيع إحدى المكائن ويغذى هذا المحول خط نقل 132 كيلوفولت له مقاومة 9 أوم ومفاعلة 30 أوم لكل طور. جد التيار الذي سيجري في كل ماكنة عندما يحدث عطل قصر دائرة للأطوار الثلاثة سوية عند طرف الحمل من الخط.

إذا أردنا وضع قاطع دائرة زيتي عند نقطة العطل بحيث أن قيمته المقننة تحدد بظرف العطل هذا فما هي أقل قيمة مقدرة لهذا القاطع ؟

(الجواب: 1225 أمبير ، 1075 أمبير ، 1075 أمبير ، 73.7 ميجا فولت أمبير)

6. محطة قدرة لها قضبان توزيع مجزأة بثلاثة أجزاء وفيها مولدات 11 كيلوفولت مربوطة على منظومة حلقية وكما يلي:

الجزء الأول: مولدان ذوا 30 و 20 ميجا فولت أمبير ومفاعلتان 0.15 و0.12 بنسبة الوحدة على التعاقب.

الجزء الثاني: مولد واحد ذو 60 ميجا فولت أمبير ومفاعلة 0.2 بنسبة الوحدة.

الجزء الثالث: مولدان ذوا 30 و60 ميجا فولت أمبير ومفاعلتان 0.18 و0.2 بنسبة بالوحدة على التوالي.

الاجزاء 1 و 2-2 و 3-3 و 1 مربوطة خلال ثلاثة ملفات مفاعلة ذات قيم مقننة 60 , 90 و 80 ميجا فولت أمبير مع مفاعلات ذات قيمة 0.2 ،0.3 ، 0.24 بنسبة الوحدة على التعاقب . جد تيار العطل عند حدوث عطل ثلاثي الطور متماثل عند الطرف البعيد لمغذٍ ذي مفاعلة 0.05 بنسبة الوحدة ومقاومة 0.01 بنسبة الوحدة وذي قيمة مقننة 30 ميجا فولت امبير مربوط إلى الجزء الثالث لقضيب التوزيع .

(الجواب: 17 800 أمبير)

تيارات الخط في منظومة ثلاثية الطور هي

$I_a = 60 + j\,40$ و $I_b = -80 + j\,20$ و $I_c = 20 - j\,60$ أمبير . احسب المركبات المتماثلة لهذه التيارات للطور a.

$$(I_1 = 6.9 - j\,8.87, I_2 = 53 + j\,48.8, I_0 = 0)$$

8. مولدان تزامنيان ثلاثيا الطور يولدان قوى دافعة كهربائية غير متساوية في المقدار ولكنها ذات فرق طور متساوٍ ومربوطان إلى قضيب توزيع واحد. احسب التيار الدوار في الطور الاحمر والفولتية الى الأرضي عند نقطة التفرع النجمي للمولد B. نقطة التفرع النجمي للمولد A مربوطة مباشرة إلى الأرضي بينما التي للمولد B مربوطة خلال مفاعلة مقدارها 1 أوم.

ق.د.ك./ طور المتولدة	B	Y	R
المولد A	850	900	1000
المولد B	900	1100	900
مفاعلات التتابع (Ω)	X_0	X_2	X_1
المولد A	1.0	2	4
المولد B	1.5	5	6

(الجواب: 19.35 أمبير، 46.8 فولت)

9. في النية نصب قاطع دائرة لحماية مولد تزامني ثلاثي الطور مربوط بشكل نجمي وذي فولتية 11كيلو فولت له مفاعلات تتابع موجب وسالب وصفري مقد ارها 10و7و3 أوم وقد تم ربط محايد المولد إلى الأرضي إلى مفاعلة 1 أوم. إذا كانت القيمة المقننة للقاطع ستحدد بالتيار الأعظم الذي سيجري تحت ظرف عطل ذو مفاعلةمقدارها صفراً ؛ فما هي القيمة المقننة للقاطع وما الفولتية القصوى لمحايد المولد نسبة لفولتية الارضي ؟

(الجواب: 15.8 ميجا فولت أمبير ، 828 فولت)

10. إذا حدثت دائرة قصيرة خط إلى خط بين الطروين b و c لخط نقل 132 كيلوفولت فاحسب تيار العطل والفولتية إلى المحايد للطور a عند نقطة العطل. مفاعلات التتابع الموجب والسالب والصفري من محطة التوليد إلى نقطة العطل على الخط هي 12 و 10 و 8 أوم على التعاقب. أهمل أية مقاومة.

(الجواب: 6000 أمبير ، 59.2 كيلو فولت)

11. حدث عطل خط واحد إلى الأرض ذي مقاومة 0.05 أوم على منظومة ثلاثية الطور مجهزة بوساطة مولد متزامن ذي قوة دافعة كهربائية 11 كيلوفولت بين الخطوط. مفاعلات التتابع الموجب والسالب والصفري للمنظومة من نقطة العطل إلى المولد هي 0.1Ω و 0.2Ω و 0.5Ω على التعاقب . اهمل مقاومات التتابع كلها مع العلم أن محايد المولد مأَرض خلال مقاومة 0.2Ω .
احسب مقدار تيار العطل.

(الجواب: 17400 أمبير)

12. حدث عطل بين الطورين الاصفر والأزرق على قضيب التوزيع لمولد تزامني له عند لحظة نشوء العطل مفاعلات تتابع طوركما يلي:

$$Z_1 = 0 + j\ 1.0\ \Omega :\ Z_2 = 0.1 + j\ 0.2\Omega : Z_0 = 0 + j\ 1.0\Omega$$

الـ ق . د . ك . لطور المولد هي 1000 فولت

احسب من المبادئ الاولية. تيارات الخط وفولتية الخط - إلى - المحايد للطور السليم الخالي من العطل.

(الجواب: 1440 أمبير ، 373 فولت)

الملحق 2

تحويل الربط النجمي الى مثلثي

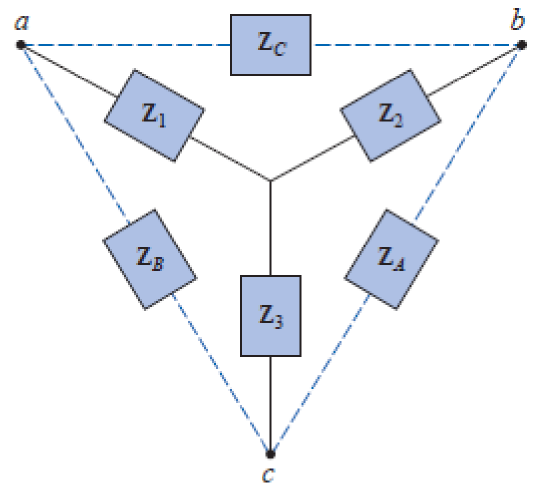
STAR-DELTA TRANSFORMATION

في أي دائرة إذا تم اعطاء الاطراف الثلاثة لأية دائرة فقط (الشكل م1-1) فان الربط النجمي للممانعات الثلاثة يمكن ابداله بربط مثلثي لهذه الممانعات وبدون التأثير على الأجزاء الباقية من هذه الدائرة. والعكس يكون صحيحاً. ان مثل هذه الممانعات يشار اليها بالممانعات المكافئة وكما في معظم نظريات الشبكات يشار اليها ايضا بالممانعات الخطية.

$$\mathbf{Z}_1 = \frac{\mathbf{Z}_B\mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B + \mathbf{Z}_C}$$

$$\mathbf{Z}_2 = \frac{\mathbf{Z}_A\mathbf{Z}_C}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B + \mathbf{Z}_C}$$

$$\mathbf{Z}_3 = \frac{\mathbf{Z}_A\mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B + \mathbf{Z}_C}$$



الشكل م 2-1 تحويل نجمي الى مثلثي

البرهان الاعتيادي على تلك المسألة يتم باحتساب الممانعات الموجودة بين أزواج الأطراف الثلاثة في كلا الدائرتين ومساواتها بمعادلات جبرية. وينتج عن هذا ثلاث معادلات آنية لثلاثة مجاهيل. عليه إذا أعطيت ممانعات الربط المثلثي الثلاث، يمكن أن نبين أن:

$$Z_1 = \frac{Z_B Z_C}{Z_A + Z_B + Z_C}$$

وذلك بتصور أن كلتا الدائرتين متراكبتان. وهذه الصيغة يمكن تعميمها كالاتي

$$Z_{star} = \frac{\text{حاصل ضرب ممانعات المثلثي عن ذلك الطرف}}{\text{مجموع الممانعات حول المثلثي}} \qquad [\text{م } 2.1]$$

وبالأسلوب نفسه. إذا كانت الممانعات نجمية

$$Z_B = \frac{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3}{Z_2}$$

$$Z_A = \frac{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3}{Z_1}$$

$$Z_C = \frac{Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_2Z_3}{Z_3}$$

$$Z_{delta} = \frac{\text{مجموع حاصل ضرب أزواج ممانعات النجمة}}{\text{الممانعة المقابلة الى طرفين إثنين}} \qquad [\text{م } 2.2]$$

وإذا كانت الممانعات الثلاثة متساوية فان الصيغة تختصر إلى

$$Z_{star} = \frac{Z_{delta}}{3} \qquad [\text{م } 2.3]$$

إن تحويل الربط النجمي إلى مثلثي يستخدم لتبسيط الشبكات المعقدة والتي غالبا ما يكون توزيع التيار فيها هو المطلوب.

الملحق رقم 3

تعويض القدرة المتفاعلة REACTIVE POWER COMPERNSATION

لقد تم تعريف ومناقشة القدرة المتفاعلة أو الفولت-أمبير المتفاعلة في الفقرة 1-8 ضمن الفصل الأول حيث عرٍفَت القدرة المتفاعلة (vars) بكونها موجبة عندما يكون انسيابها إلى محاثة L. وفي اشتغال منظومة قدرة معينة تؤخذ القدرة المتفاعلة اصطلاحاً لتشير إلى الـ vars المتأخرة ويعين بذلك اتجاه التدفق لأي جهاز من الأجهزة إما أن يكون مستورد أو يكون مورد (مصدر) للـ vars .عليه فأن أية محاثة L هي تستورد الـ vars. أما المتسعة C فتمتص الـ vars المتقدمة ويقال عنها مصدرة (أو مولدة أو موردٍة) للـ vars.

إن مخطط الاداء لماكنة تزامنية يكون مشابهاً للمخططات المبينة في الاشكال 2-6 ، 2-7 ، 2-8 (للخط القصير) في الفصل الثاني، وذلك بوضع E_O بدل V_S و V بدل V_Rمع الأخذ بعين الاعتبار أن الممانعة التزامنية للمولد تكون أكبر بكثير من ممانعة الخط القصير، وحيث أن الماكنة التزامنية، المعروف عنها إنها تكون إما مستوردة أو مصدرة للقدرة، فإنها تصدر (أو تولد) الـ vars عندما تكون المغناطيسية فيها في حالة مفرطة (مفرطة – الاثارة) وتستورد الـ vars في حالة إن تكون المغناطيسية قليلة (إثارة منخفضة) فإنها تستورد معظم الـ vars وذلك لتغذية تيارات المغنطة للمحولات والمحركات الحثية .... الخ. وفي أية لحظة زمنية يكون الطلب على vars في الشبكة الكبرى ثابتاً بالمقدار والموقع ويتحدد بالفولتية المجهزة عند طرف المستهلكين أي عندما تكون أكثر المنشآت في حالة اشتغال في ذلك الوقت،

في الفقرة 2-4 في الفصل الثاني تمت مناقشة العلاقة بين الطلب الحاصل على الـ vars والهبوط بالفولتية على طول خط قصير مفرد، حيث تم بيان أن السبب الأول لهبوط الفولتية بأنه نتيجة لمرور تيار متفاعل ومتأخر في محاثة التوالي للخط؛ وهذه المقولة تتحقق بصورة خاصة عندما تكون مفاعلة الخط أكبر من مقاومته. كذلك فالتيار المتفاعل لا يجود بأي نفع وإنما يسبب علاوة على ذلك مفاقيد مقاومية I^2R في عموم الشبكة. عليه فإن الفولت-أمبير vars يجب أن تتولد في المساحات المستوردة في المنظومة حيثما كان هذ ممكناً من الناحية الفنية. الغرض من الشبكة الكبرى هو نقل القدرة بأقل قيمة ممكنة للفولت-أمبير المتفاعلة vars، ولكمية معينة من الـ var المنقولة عبر خط ما يكون الهبوط بالفولتية بنسبة الوحدة عالياً إذا كانت ممانعة الخط عالية، أي أن مستوى العطل يكون واطئاً (انظر الفقرة 12-3)، والعكس يكون صحيحاً بالنسبة للخطوط الثقيلة التحميل القصيرة الطول ذات الفولتية 400 كيلو فولت فأكثر والتي تنقل كميات كبيرة من القدرة.

جرت العادة على تسمية الفولتية عند جميع قضبان التوزيع لمنظومة الشبكة الكبرى بمنسوب الفولتية، وذلك نسبة إلى الفولتية الاسمية. وبما أن قواطع الدائرة والمحولات وعوازل الخطوط لمنظومة 400 كيلو فولت تشتغل ضمن حدود قريبة من القيم المصممة عليها هذه الأجهزة ، فإن أعظم فولتية يسمح أن تشتغل بها هذه الأجهزة في هذه الحالة هي 420 كيلو فولت (أي + 5%) عليه فإن الشبكة الكبرى ذات 400 كيلو فولت قد تشتغل بمنسوب فولتية حوالي ± 5% ؛ وتبعاً لذلك فقد يتحتم على بعض خطوط الـ 400 كيلو فولت أن تغذي حملاً مع هبوط فولتية أقل من 10%، عليه يجب أن يكون عامل القدرة قريباً من قيمة الواحد ويكون متقدماً. ويكون هذا حقيقياً بصورة خاصة للخطوط الأطول من 125 كيلو متراً. هنا يجب أن نذكر القارئ ما جاء في التعليق في الفقرة 2-4 من أن أهم العوامل التي تؤثر على هبوط الفولتية هي حاصل

ضرب مقدار الحمل في مسافة النقل (أي MVA . كيلومتر) وكذلك عامل القدرة. وتجدر الإشارة إلى أن منظومات القدرة ذات فولتية 275 كيلو فولت فأقل يمكن أن تعمل عادة بهبوط فولتية ضمن حوالي ±10%.

بالنسبة للخط الطويل إذا عومل وكأنه شبكة ذات أربع أطراف، ففي فترات الحمل الأعظم تكون الـ vars الممتصة من قبل محاثة التوالي للخط ($2\ \pi\ \omega LI^2$) أكبر من الـ vars المتولدة بواسطة متسعة التوازي للخط نفسه ($2\ \pi\omega/CV^2$)؛ وكذلك تكون $V_S > V_R$ خاصة لحمل ذي عامل قدرة متأخر. في الحالات المتطرفة قد يكون من الضروري للخط أن يستورد الـ vars عند كلا نهايتيه (وهذا يعني أن الحمل المجهز يكون ذا عامل قدرة متقدم وذلك لتقليل هبوط الفولتية، وعلاوة على ذلك يجب الإيفاء بحاجة المستهلكين من القدرة المتفاعلة vars أيضاً).

في أوقات الحمل الخفيف يقوم الخط بتوليد الـ vars وإذا ازدادت هذه عن حاجة المستهلكين فإن الـ vars الفائضة يجب أن تمتص وذلك بتشغيل المولدات التزامنية بإثارة قليلة (دون الاثارة الاعتيادية). وهناك أيضاً ميل لفولتية المنظومة بأن ترتفع بحيث تكون ($V_R>V_S$)، وقد تُسهَل هذه المشكلة بإخراج عدد من الخطوط من الخدمة وبتقليل فولتية الشبكة الكبرى نفسها.

عندما يكون الحمل المربوط في نهاية استلام خط معين معادلاً لذلك الحمل المأخوذ من قبل الممانعة المميزة للخط Z_C عندئذ يقال إن الخط يشتغل بحمله الطبيعي. وفي حالة الحمل الطبيعي تكون الـ vars الممتصة من قبل محاثة التوالي مساوية لتلك المتولدة من قبل متسعة التوازي وكذلك تكون V_R مساوية تقريباً إلى V_S.

كذلك يتم الحصول على القدرة المتفاعلة اعتيادياً من المولدات المربوطة إلى المنظومة، ويجب في هذه الحالة أن تكون المولدات لها عوامل قدرة مقننة تتراوح ما بين 0.8 الى 0.9 متأخرة. وخلال الحمل الأعظم على الشبكة حينما تكون المولدات محملة بقدراتها المقننة تقريباً يكون هناك حد معين للـ vars الذي يمكن أن تولده هذه المولدات كذلك الحال خلال الحمل الأدنى على الشبكة وعندما تكون المولدات تشتغل بإثارة مغناطيسية منخفضة لكنها تشتغل بقدرتها المقننة تقريباً، (السبب في ذلك كون أن قسماً قليلاً من المولدات يكون في حالة اشتغال والباقي في حالة إطفاء)، فان هناك حداً للـ vars الذي يمكن لهذه المولدات أن تمتصه حتى لا تزيد زاوية الحمل لها (زاوية الدوار) على حوالي 75°.

لهذه الأسباب فأنه من الضروري في بعض الأحيان استخدام أجهزة تسمى بأجهزة تعويض القدرة المتفاعلة لغرض توليد الـ vars أو امتصاصها. حيث أن المحاثة المربوطة على التوازي تمتص الـ vars بينما تولد المتسعة المربوطة على التوازي هذه الـ vars. كذلك فإن المكائن التزامنية المصممة خصيصاً يمكنها أن تولد الـ vars أو تمتصها إذا كانت حالة الإثارة المغناطيسية فيها مفرطةً أو منخفضة على التعاقب. ولهذا يطلق عليها المعوضات التزامنية (متسعات أو معدلات طور). ومما يرغب فيه هو أن تكون هذه المعوضات متنقلة، حيث أن موقعها الأمثل قد يكون معرضاً للتبديل من مكان لآخر تبعاً لتغير موقع الحمل وأنماطه في المنظومة.

إن أجهزة التعويض يشار اليها حسب سرعة ربطها وإدخالها في العمل إما أن تكون سريعة أو بطيئة بحيث أن السيطرة على فولتية المنظومة خلال تغيرات الحمل الطبيعية يجب عندها التمكن من تشغيل هذه الأجهزة بسرعة وخلال بضع دقائق؛ أي بمقدار الزمن اللازم لتشغيل مآخذ المحولات في المنظومة مثلاً. كذلك يجب أن يكون اشتغال أجهزة التعويض لحظياً وذاتياً تقريباً لضمان استقرارية المنظومة، وأيضاً

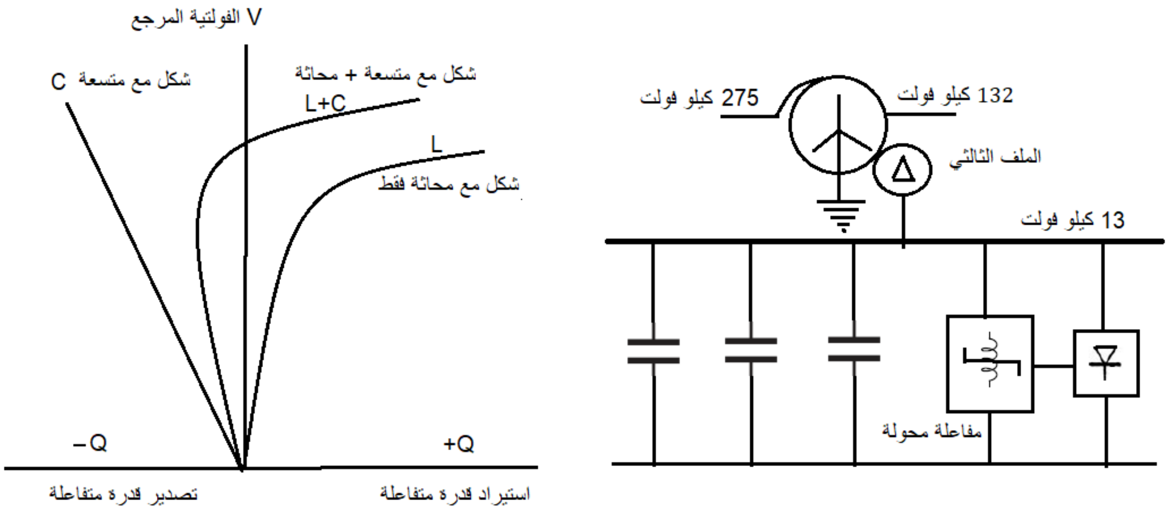
المحافظة على فولتية المنظومة التي تميل إلى الانخفاض عندما تكون الشبكة الكبرى ثقيلة التحميل وبعد أن يتم عزل الخطوط التي تتعرض للعطل.

التعويض الستاتيكي STATIC COMPENSATION

يكون التعويض الستاتيكي على نوعين:

- تعويض التوازي
- تعويض التوالي

يعود استعمال تعويض التوازي باستخدام متسعات التوازي لتحسين معامل القدرة الى سنة 1914 حيث تربط مجموعة من المتسعات على التوازي مع الحمل. ويعمل التيار الذي تسحبه المتسعات الذي يكون ذي عامل قدرة متقدم على معادلة (تعويض) تيار الحمل ذي عامل القدرة المتأخر. ويبين الشكل م3-1 جهاز تعويض ستايتكي باستخدام محاثة ومتسعة مربوطتين على التوازي. يربط هذا الجهاز في الغالب عند طرف الاستلام للخط وفي ملف الثالثي المربوط على شكل مثلثي في المحول، تستخدم المتسعات عندما يكون الطلب على الحمل شديداً. إذا كانت عملية إدخال وإخراج هذه المجاميع يدوية فإن السيطرة تكون بطيئة خلال الحمل الأعظم للمنظومة. وحين تتعرض فولتية المنظومة للانخفاض، فان خرج الفولت-أمبير المتفاعلة لهذه المتسعات يكون أدنى ما يمكن، وهذا يجعل المعضلة أسوأ. أما المحاثة التي تستخدم عندما يكون الحمل على المنظومة منخفضاً فيمكن أن تكون من النوع الهوائي القلب الذي لا يحتوي على معدن، أومن نوع قلب ذي فجوة، مثل المفاعل المتشبع Saturated Reactor أو المفاعلة المحولة Transfer Reactance. النوع ذو القلب الهوائي يكون خطياً ويستخدم للتقنيات والفولتيات الكبيرة (مثلاً 100 MVA عند 400 كيلوفولت) .



(ب) (أ)

الشكل م 3-1 التعويض الستاتيكي للقدرة المتفاعلة.

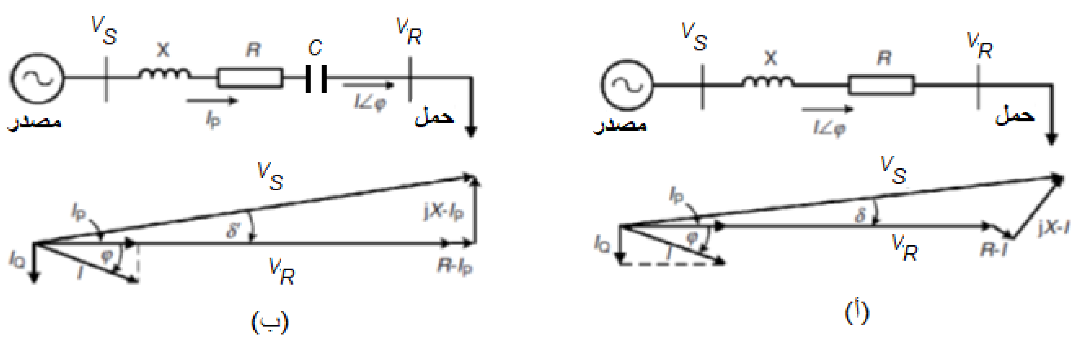
تصمم الأنواع من المحاثات ذات القلوب التي تحتوي على فجوة بحيث تكون خطية لحد فولتية قد تصل إلى 1.3 بنسبة الوحدة حيث أن كلا هذين النوعين سوف يمتص الـ vas بمعدل يتناسب مع مربع فولتية الطرف (في حالة كون قيمة المفاعلة معلومة) ؛ فللسيطرة البطيئة يمكن تزويد الملف المفاعل بمأخذ تغيير أو تركيبه على محول مساعد (وهذا الأخير سوف يزيد من كلفة النصب والتشغيل للمشروع). عوضاً عن ذلك قد يستخدم المشروع محولاً مساعداً بمأخذ متغير ومربوط على شكل نجمي يمكن تنظيم الفولتية فيه نزولاً إلى الصفر لغرض تغذية متسعة ثابتة أو محاثة ثابتة عن طريق مفتاح اختيار ذي طريقين يشتغل في حالة اللاحمل فقط ، هذا المشروع يكون رخيصاً نسبياً وبسيطاً ولا يحتاج إلى ادامة كثيرة .

بالإمكان استخدام ملف نفاعل متشبع ذي مأخذ متغير يتشبع بفولتيات مختارة ضمن المدى ± 10% من الفولتية المقننة ، عندما يتشبع هذا الملف لمفاعل فان الـ vars الممتصة من قبله تتغير بسرعة لتغيرات قليلة بالفولتية. وتستخدم هذه المفاعلات على التوازي مع متسعات تكون خواص العلاقة بين الفولتية و الـ vars المصدرة لمتسعة ما خطأً مستقيماً يمر بنقطة الاصل، وتكون خواص العلاقة بين الفولتية و الـ vars المستوردة لملف مفاعل متشبع مشابهه لمنحنى المغنطة للمحول الاعتيادي. وعند اشتغال المفاعلات المتشعبة والمتسعات على التوازي فتكون الخواص -عند ازدياد الفولتية- مشابهة في البداية لتلك التي تكون لمتسعة وبعدها تتأرجح نحو خواص ملف المفاعل المتشبع عند تغير الفولتية ما بين 90 إلى 100% من قيمتها الاسمية. لذا فإن الجهاز يقوم بتصدير القدرة المتفاعلة عند الفولتية المنخفضة بينما يستورد هذه القدرة عند الفولتية العالية (الشكل م 3-1 ب) .

إن تجهيز القدرة الهائلة للمناطق المعمورة الواسعة يكون في الغالب بوساطة كيبلات أرضية (بحدود 20 كم طول) وتعمل هذه الكيبلات بفولتية 132 كيلو فولت فأعلى. لهذه الكيبلات متسعات كبيرة تعتبر مصدراً للقدرة المتفاعلة حتى في حالات نقلها تياراً مقنناً. وتمتص هذه القدرة المتفاعلة بوساطة محاثات توازٍ مربوطة على مسافات يكون التباعد بينها بضع كيلو مترات على طول الكيبلات.

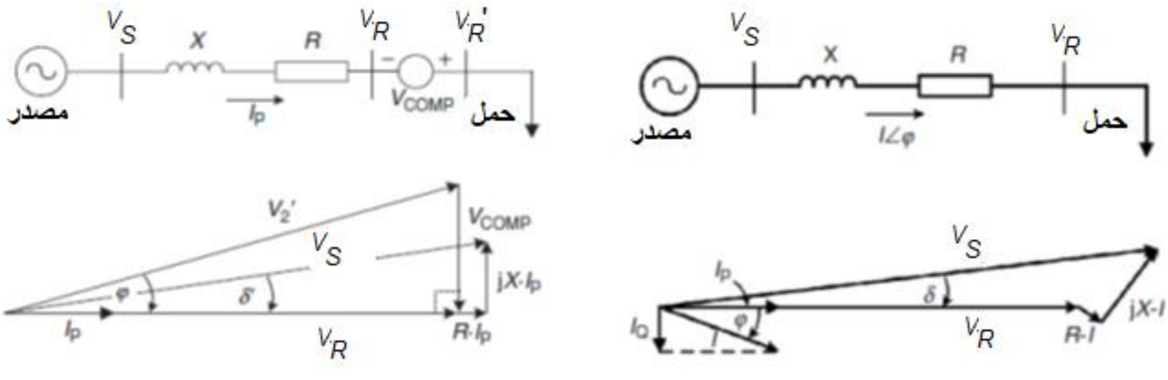
تعويض التوالي

بدلاً من ربط المتسعات على التوازي مع الخطوط يتم ربطها في بعض الأحيان على التوالي في الخطوط حيث تولد متسعات التعويض هذه قدرة متفاعلة vars تتناسب مع مربع التيار المار بها. واستخدامها الأساسي هو لتقليل ممانعة التوالي للخط وذلك بحذف حوالي 50 % من قيمة محاثة التوالي للخط لكي يرتفع حد القدرة المنقولة في الخط وبذلك تتحسن استقرارية المنظومة، أنظر الشكل م 3-2.



الشكل م 3-2 : (أ) خط نقل غير معوض ، (ب) خط نقل بتعويض توالي بواسطة متسعة C .

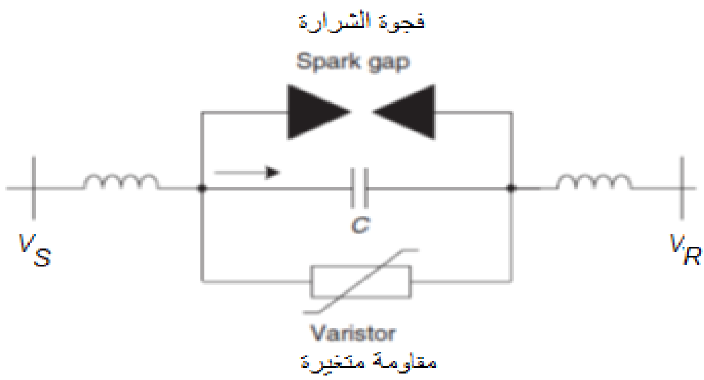
والطريقة الثانية لتعويض التوالي هو باستخدام مصدر تيار أو مصدر فولتية معوض. في هذا النوع من التعويض يتم حقن تيار أو فولتية على التوالي مع الحمل لكي يتم معالجة عدم التوازن في الفولتية عند أطراف الحمل وذلك بتجهيز مركبة الفولتية اللازمة لجعل الفولتية عند الحمل متوازنة وبقيمتها المقننة الثابتة لضمان التشغيل الأمثل ، أنظر الشكل م 3-3.



(ب) (أ)

الشكل م 3-3: (ا) خط نقل غير معوض، (ب) خط نقل بتعويض توالي بواسطة فولتية معوضة V_{COMP}.

ويبرر استخدام متسعات التوالي عادة في منظومات القدرة التي تحتوي على خطوط طويلة في الشبكة الكبرى بحيث أن تأثير استخدام متسعة التوالي على فولتية المنظومة يكون كما مبين في الشكل م 3-3، فلحمل ذي عامل قدرة متأخر $V_R > V_S$ يكون هبوط الفولتية V_S و V_R هو أقل من هبوط الفولتية بين V_S و V_R ، لكن هناك مشكلة بالنسبة لمتسعات التوالي هذه هي أنها عندما تحمل هذه المتسعات تيار عطل فإن الفولتية التي تكون عبرها تتعدى عموماً الفولتية المقننة للمتسعة نفسها ، عليه فان متسعات التوالي يربط معها على التوازي وسيلة حماية هي عبارة عن فجوات شرارة توضع لتمرير الشرر العرضي عندما يكون تيار العطل معادلاً لثلاثة امثال التيار المقنن لهذه المتسعة، وتربط مع فجوات الشرارة هذه وعلى التوازي مقاومة متغيرة من نوع أوكسيد المعدن Varistors metaloxide غير خطية مع ومفتاح تجاوزسريع Fast bypass switch على التوالي قد يكون قاطع دائرة يكون مفتوحاً في الوضع الطبيعي ومربوطاً على التوازي مع المتسعة. وسيلة الحماية هذه كما موضحة في الشكل م 3-4.



الشكل م 3-4 متسعة تعويض توالي مع وسيلة الحماية الخاصة بها.

في الوقت الحاضر تستخدم معوضات توازي وتوالي أجهزة حديثة مبنية على أساس الكترونيات القدرة. وتمتاز هذه الأجهزة بالمرونة والسرعة العالية والوثوقية الكبيرة ومثال هذه الأجهزة المستخدمة هي المقطعات والمغيرات التي تستخدم نبائط الثايرستور وترانزستورات القدرة.

المعوضات التزامنية SYNCHRONOUS COMPENSATION

تكون المعوضات التزامنية أساساً عبارة عن محركات تزامنية بدون خرج ميكانيكي ويكون تصميمها عادة باقطاب بارزة (6 أو 8 اقطاب) وبتقنين أقصاه حوالي 60 MVA ، 13 كيلو فولت (وقد تربط إلى المنظومات التي لها فولتيات أعلى بوساطة محولات) . وهناك طرق متعددة لبدء تشغيل هذه المعوضات منها تقليل الفولتية باستخدام مغير المأخذ على المحول وكذلك باستخدام ملف قفصي على اوجه الاقطاب أو باستعمال محرك مساعد وقد يكون هذا محركاً حثياً ذا دوار قفصي أو ملفوف أو يكون محركاً تزامنياً – حثياً.

ويكون تسلسل بدء التشغيل عادة تحت سيطرة ذاتية (اوتوماتيكية) ، وتكون السيطرة على المعوضات في حالة اشتغاله ذاتية أيضاً. يتم تنظيم الاثارة ذاتياً لتعطي أما فولتية طرف ثابتة أو قدرة متفاعلة vars ثابتة وتخضع هذه لحدود الاثارة المفرطة أو دون الاثارة (لمنع الاشتغال غير المستقر). أما طرق السيطرة والحصول على منظومة التيار المستمر لملف الاثارة في المعوضات التزامنية فتكون مشابهة لتلك التي تستخدم في المولدات التزامنية الاعتيادية. وتكون السيطرة على المعوضات التزامنية سريعة ومستمرة من تصدير قدرة متفاعلة vars مقننة إلى حوالي استيراد نصف القدرة. وخلافاً للأجهزة الستاتيكية الأخرى فأن هذه الاجهزة تقوم بدفع تيار إلى المنظومة في حالة وقوع عطل (أي ترفع من مستوى العطل)، عليه فهي معرضة لأن تصبح غير مستقرة وتحتاج إلى صيانة عالية نسبياً. وتتطلب الأحمال الكهربائية المتقلبة على الدوام وبسرعة مثل مصانع الصلب والأفران الكهربائية أجهزة تعويض سريعة وذاتية توضع قريبة منها قدر الامكان. وفي حالة خطوط النقل العلوية الطويلة جداً تربط المعوضات على التوازي مع الخط وعلى مسافات بحوالي 150 كيلو متر.

الملحق 4

شبكات ترشيح المركبات المتماثلة

Symmetrical Component Filter Networks

تستعمل شبكات ترشيح المركبات المتماثلة في منظومات القدرة ثلاثية الطور وذلل لقياس التيار أو الفولتية للمركبات المتماثلة. ومن المعروف أن وجود تيار التتابع صفري يشير عادة إلى وجود عطل أرض على خطوط النقل ولكنه، قد يكون كذلك بسبب تيارات التسرب غير المتوازنة التي تحدث على سطوح عوازل متسخة بالغبار وغيره أو بسبب تيارات شحن الخط نفسه المتسربة إلى الأرض ذات الطبيعة الاتجاهية.

وتيارات التتابع السالب هي المسؤولة عن تسبب الحرارة الزائدة في دوارات المولدات التزامنية. أما فولتية التتابع الموجب فتستعمل أحيانا لتشغيل منظم الفولتية الذاتى (AVR) الذي يسيطر على الاثارة المغناطيسية للمولد التزامني. وسنناقش الآن أنواع قليلة فقط من الدوائر المتوفرة في الحياة العملية للترشيح.

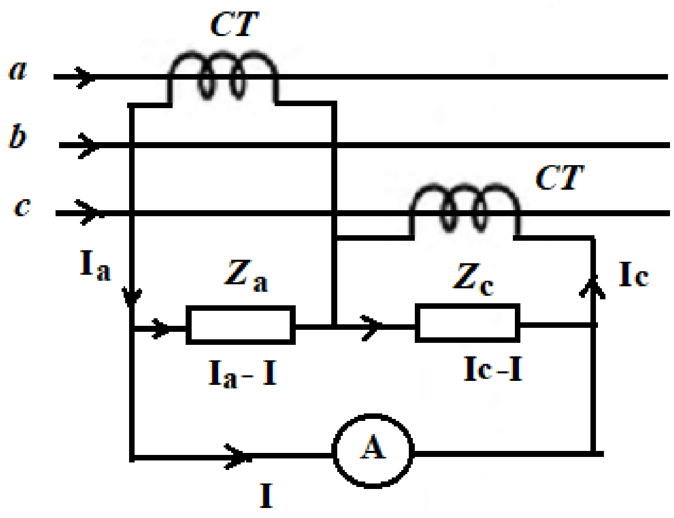
4-1 تيار التتابع SEQUENCE CURRENT

يمكن قياس تيار التتابع الصفري عن طريق ربط مقياس تيار (أو مرحل) عبر محولات تيار (C.T.s) لكشف تيار عطل. هذه المحولات يجب أن تكون متماثلة مع بعضها ومربوطة على التوازي (ربطاً إستبقائياً). محولات التيار هذه المربوطة ربط استبقائي تقوم بقياس التيار المتبقي الذي يساوي ثلاثة أضعاف تيار التتابع الصفري. دائرة قياس تيار التتابع الصفري هذه مبينة في الشكل م 4-1. وإذا كانت الدائرة الابتدائية مكونة من كيبل ثلاثي الموصل فإننا نحتاج إلى محول تيار واحد فقط يثبت فوق الكيبل على شرط أن يحوي غلاف وتسليح الكيبل بحيث تطوى نهايتيهما سوية وتبعدان خارج محور محول التيار. من هذه الدائرة يمكن أن نستنتج المعادلات الآتية:

$$(I_a - I)Z_a + (I_c - I)Z_c - IZ = 0$$

$$I = \frac{(I_a Z_a + I_c Z_c)}{Z_a + Z_c + Z}$$

$$I = \frac{I_{a1}(Z_a + hZ_c) + I_{a2}(Z_a + h^2 Z_c) + I_{a0}(Z_a + Z_c)}{Z_a + Z_c + Z}$$



الشكل م4-1دائرة لقياس التتابع الصفري.

وبما أن $(Z_a + Z_c)$ لا يمكن أن تكون قيمتها صفراً فإن تيار التتابع الصفري يمكن إخماده وبالتالي ترشيحه باستخدام محولات تيار إضافية مساعدة. وهناك طريقة أبسط وذلك باستخدام محولات تيار عدد 4 متماثلة مع بعضها البعض وتربط كل اثنين منهما على التوازي وبقطبية متعاكسة وتربط المجموعة كلها على أحد الأطوار ويفضل الطور b .

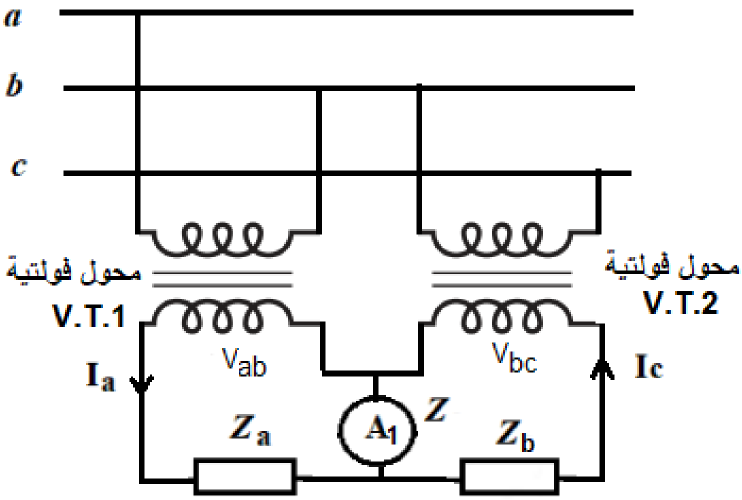
فولتية التتابع SEQUENCE VOLTAGE

فولتية التتابع الصفري يمكن قياسها باستعمال محول فولتية ثلاثي الطور (V.T) ذي ابتدائي مربوط نجميا ومؤرض مباشرة وله ثانوي مربوط مثلثياً مفتوح Open delta وقد ربط عبره مقياس فولتية، إن مقياس الفولتية سيقيس المجموع الطوري لفولتيات خط إلى الأرض الثلاث (الفولتية المتبقية) والتي تساوي ثلاثة أضعاف فولتية التتابع الصفري.

الدائرة الخاصة بقياس فولتية التتابع الموجب مبينة في الشكل م 4-2، يكون مقياسا الفولتية V.T.s الاثنان متطابقتين تماماً وبذلك فان الفولتيات المقاسة:

$$V_{ab} = I_a Z_a + (I_a - I_b)Z$$

$$V_{bc} = I_b Z_b - (I_a - I_b)Z$$



الشكل م 4-2 دائرة لقياس فولتية التتابع الموجب.

وبحل هاتين المعادلتين تكون قيمة التيار في مقياس التيار A_1 كما يأتي:

$$I_a - I_b = \frac{V_{ab}Z_b - V_{bc}Z_a}{Z_aZ_b + Z(Z_a + Z_b)}$$

فولتيات الخط الثلاث V_{ab} و V_{bc} و V_{ca} ليس لها مركبة تتابع صغري. إذا أخذنا V_{ab} طوراً مرجعاً فإن:

$$I_a - I_b = \frac{V_{ab1}(Z_b - h^2Z_a) + V_{ab2}(Z_b - hZ_a)}{Z_aZ_b + Z(Z_a + Z_b)}$$

هذه المعادلة مستقلة تماماً عن فولتية التتابع السالب عندما $Z_b = Z_a \angle 120^o$ أي أن الممانعتين تكونان متساويتين رقمياً وزاويتاهما تختلفان بمقدار 120° .

الحل الممكن هو أن تكون $Z_a = Z' \angle -90^o$ و $Z_b = Z' \angle 30^o$ إذا فرضنا أن ممانعة مقياس التيار يمكن اهمالها مقارنة مع Z' (كونها عبء محول الفولتية V.T.) ستكون لها قيمة أومية عالية عليه فإن عمل الدائرة أعلاه يفترض أن فولتيات الخط فيها تشكل منظومة ثلاثية الطور متوازنة وأن ممانعة مقياس التيار يمكن اعتبارها تساوي صفراً.

الملحق 5

المراجع الأجنبية والعربية

1- المراجع الأجنبية

References

1.Irwin, J.D., Basic Engineering Circuit Analysis, 5th ed., Prentice-Hall, New Jersey, 1996.

2.Blackburn, J.L., Symmetrical Components for Power Systems Engineering, Marcel Dekker, New York, 1993.

3.Fortescue, C.L., Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks, AIEE Transaction, 37, part 2, 1918.

4.Glover, J.D. and Sarma, M., Power System Analysis and Design, PWS-Kent Publishing Company, Boston, MA, 1989.

5.Grainger, J.J. and Stevenson, Jr., W.D., Power System Analysis, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.

6.Gross, C.A., Power System Analysis, 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, New York, 1986.

7. Bergen, A.R. and Vital, V., Power Systems Analysis, 2nd ed., Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 2000.

8.Elgerd, O.I., Electric Energy Systems Theory—An Introduction, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, NY, 1982.

9.Glover, J.D. and Sarma, M., Power System Analysis and Design, 3rd ed., Brooks, Cole, Pacific Grove, CA, 2002.

10.Grainger, J.J. and Stevenson, W.D., Elements of Power System Analysis, McGraw-Hill, New York, 1994.

11.Gross, C.A. Power System Analysis, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, 1986.

12. P.M. Anderson, Analysis of Faulted Power Systems, Ames: Iowa State Press, 1973.

13. M.E. El-Hawary, Electric Power Systems: Design and Analysis, Reston, Va.: Reston Publishing, 1983.

14. M.E. El-Hawary, Electric Power Systems, New York: IEEE Press, 1995.

15. O.I. Elgerd, Electric Energy Systems Theory: An Introduction, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1982.

16. General Electric, Short-Circuit Current Calculations for Industrial and Commercial Power Systems, Publication GET-3550.

17. C.A. Gross, Power System Analysis, 2nd ed., New York: Wiley, 1986.

18. S.H. Horowitz, Power System Relaying, 2nd ed, New York: Wiley, 1995.

19. I. Lazar, Electrical Systems Analysis and Design for Industrial Plants, New York: McGraw-Hill, 1980.
20. C.R. Mason, The Art and Science of Protective Relaying, New York: Wiley, 1956.
21. J.R. Neuenswander, Modern Power Systems, Scranton, Pa.: International Textbook, 1971.
22. G. Stagg and A.H. El-Abiad, Computer Methods in Power System Analysis, New York: McGraw-Hill, 1968.
23. Westinghouse Electric Corporation, Applied Protective Relaying, Relay-Instrument Division, Newark, N.J., 1976.
24. A.J. Wood, Power Generation, Operation, and Control, New York: Wiley, 1996.
25. Anderson, R.B. and Eriksson, A.J., Lightning parameters for engineering applications, Electra, 69,65–102, March 1980.
July 1975.
26. Electric Power Systems, CIGRE Report#172, TF33.01.02, December 2000.
27. Armstrong, H.R. and Whitehead, E.R., Field and analytical studies of transmission line shielding, IEEE Trans. Power Apparatus Systems, PAS-87, 270–281, 1968.
Bewley, L.V., Traveling Waves on Transmission Systems, 2nd ed., John Wiley, New York, 1951.
28. Brown, G.W. and Whitehead, E.R., Field and analytical studies of transmission line shielding: Part II, IEEE Trans. Power Apparatus Systems, PAS-88, 617–626, 1969.
and the computation of operation-induced surge waveforms for GIS disconnectors, CIGRE,
28. IEC 71-1, Insulation Co-ordination—Part 1: Definitions, Principles and Rules, 1993.
28. IEC 71-2, Insulation Co-ordination—Part 2: Application Guide, 1996.
29. ANSI=IEEE Std 80-2000, IEEE Guide for Safety in Substation Grounding, IEEE Press, Piscataway, NJ, 2000.
30. Bewley, L.V., Traveling Waves on Transmission Systems, Dover, New York, 1963.
31. Chow, Y.L. and Yovanovich, M.M., The shape factor of the capacitance of a conductor, J. Appl. Phys., 52, December 1982.

32. Deri, A., Tevan, G., Semlyen, A. and Castanheira, A., The complex ground return plane—a simplified model for homogeneous and multilayer earth return, IEEE Trans. Power Apparatus Systems, PAS- 100(8), August 1981.
33. Smythe, W.R., Static and Dynamic Electricity, McGraw-Hill, New York, 1950.
34. Sunde, E.D., Earth Conduction Effects in Transmission Systems, Van Nostrand, Toronto, 1949.
35. Visacro, S. and Portela, C.M., Soil permittivity and conductivity behavior on frequency range of transient phenomena in electric power systems, in Proceedings of 5th ISH, Paper 93.06, August 1987.
36. Weber, E., Electromagnetic Fields Theory and Applications Volume 1—Mapping of Fields, Wiley, New York, 1950.
37. Greenwood, A.N., Electrical Transients in Power Systems, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1991, pp. 533–534.
38. Hamel, A. and St. Jean, G., Comparison of ANSI, IEC, and CSA standards' durability requirements on station-type metal oxide surge arresters for EHV power systems, IEEE Trans. Power Delivery, 7(3), 1283–1298, July 1992.
39. Hileman, A.R., Insulation Coordination for Power Systems, Marcel Dekker, Inc., 1999, pp. 497–675.
40. IEC Standard 60099-6, Edition 1.0, Surge Arresters—Part 6: Surge Arresters Containing both Series and Parallel Gapped Structures—Rated 52 kV and Less, International Electrotechnical Commission, August 2002.
41. IEEE PES Task Force on Data for Modelling System Transients, Parameter determination for modelling system transients—part v: surge arresters, IEEE Trans. Power Delivery, 20(3), 2073–2078, July 2005.
42. Ribeiro, J.R., Lambert, S.R. and Wilson, D.D., Protection of compact transmission lines with metal oxide arresters, CIGRE Leningrad Symposium, 400-6, S33–S91, 1991.
43. Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above, 1st ed., Electric Power Research Institute, 1975.
44. Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above, 2nd ed., Electric Power Research Institute, 1982.
45. Electric Power Research Institute (EPRI), EPRI AC Transmission Line Reference
Book—200 kV and Above (Palo Alto, CA: EPRI, www.epri.com, December 2005).

46. Westinghouse Electric Corporation, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 4th ed. (East Pittsburgh, PA, 1964).
47. General Electric Company, Electric Utility Systems and Practices, 4th ed. (New York: Wiley, 1983).
48. John R. Carson, ‘‘Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return,’’ Bell System Tech. J. 5 (1926): 539–554.
49. C. F. Wagner and R. D. Evans, Symmetrical Components (New York: McGraw-Hill,1933).
50. Paul M. Anderson, Analysis of Faulted Power Systems (Ames, IA: Iowa State Press,1973).
51. M. H. Hesse, ‘‘Electromagnetic and Electrostatic Transmission Line Parameters by Digital Computer,’’ Trans. IEEE PAS-82 (1963): 282–291.
52. W. D. Stevenson, Jr., Elements of Power System Analysis, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1982).
53. A. J. Peterson, Jr. and S. Hofmann, ‘‘Transmission Line Conductor Design Comes of Age,’’ Transmission & Distribution World Magazine (www.tdworld.com, June 2003).
54. ANCI C2. National Electrical Safety Code, 2007 edition (New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers).
55. R. S. Gorur, ‘‘Six Utilities Share Their Perspectives on Insulators,’’ Transmission & Distribution World Magazine, (www.tdworld.com, April 1, 2010).
56. Electric Power Research Institute (EPRI), EPRI AC Transmission Line Reference Book—200 kV and Above (Palo Alto, CA: EPRI, www.epri.com, December 2005).
57. R. D. Dunlop, R. Gutman, and P. P. Marchenko, ‘‘Analytical Development of Loadability Characteristics for EHV and UHV Lines,’’ IEEE Trans. PAS, Vol. PAS-98, No. 2 (March/April 1979): pp. 606–607.
58. W. D. Stevenson, Jr., Elements of Power System Analysis, 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1982).
59. W. H. Hayt, Jr., and J. E. Kemmerly, Engineering Circuit Analysis, 7th ed. (New York: McGraw-Hill, 2006).
60. Westinghouse Electric Corporation, Applied Protective Relaying (Newark, NJ: Westinghouse,1976).
61. D. Dufournet, ‘‘Circuit Breakers Go High Voltage,’’ IEEE Power & Energy Magazine,7, 1(January/February 2009), pp. 34–40.

62. Westinghouse Electric Corporation, Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 4th ed. (East Pittsburgh, PA, 1964).
63. Westinghouse Electric Corporation, Applied Protective Relaying (Newark, NJ, 1976).
64. J. R. Neuenswander, Modern Power Systems (New York: Intext Educational Publishers, 1971).
65. H. E. Brown, Solution of Large Networks by Matrix Methods (New York: Wiley,1975).
66. C. A. Gross, Power System Analysis (New York: Wiley, 1979).
67. Westinghouse Electric Corporation, Electric Utility Engineering Reference Book: Distribution Systems (Pittsburgh, PA: Westinghouse, 1959).
68. J. L. Blackburn, Protective Relaying (New York: Dekker, 1997).
69. J. L. Blackburn et al., Applied Protective Relaying (Newark, NJ: Westinghouse Electric Corporation, 1976).
70. Westinghouse Relay Manual, A New Silent Sentinels Publication (Newark, NJ: Westinghouse Electric Corporation, 1972).
71. J. W. Ingleson et al., ‘‘Bibliography of Relay Literature. 1986–1987. IEEE Committee Report,’’ IEEE Transactions on Power Delivery, 4, 3, pp. 1649–1658 (July 1989).
72. IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems—IEEE Bu¤ Book, IEEE Standard 242-2001 (www.ieee.org, January 2001).
73. C. Russel Mason, The Art and Science of Protective Relaying (New York: Wiley,1956).
74. C. A. Gross, Power System Analysis (New York: Wiley, 1979).
75. A. R. Bergen, Power System Analysis (Englewood Cli¤s, NJ: Prentice-Hall, 1986).
76. S. H. Horowitz and A. G. Phadke, Power System Relaying (New York: Research Studies Press, 1992).
77. A. G. Phadke and J. S. Thorpe, Computer Relaying for Power Systems (New York: Wiley, 1988).
78. C. F. Henville, ‘‘Digital Relay Reports Verify Power System Models,’’ IEEE Computer Applications in Power, 13, 1 (January 2000), pp. 26–32.
78. S. Horowitz, A. Phadke, and B. Renz, ‘‘The Future of Power Transmission,’’ IEEE Power & Energy Magazine, 8, 2 (March/April 2010), pp. 34–40.
79. D. Reimert, Protective Relaying for Power Generation Systems (Boca Raton, FL: CRC Press, 2005).

2- المراجع العربية

1. تحليل نظم القدرة الكهربائية ، الدكتور علي حمزة والدكتور خالد زيدان ، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية ، جامعة دمشق ، 2017.

2. هندسة القدرة الكهربائية، الدكتور مأمون فاضل والدكتور فاروق خليل، جامعة الموصل -1989.

3.نظرية أنظمة الطاقة الكهربائية - مقدمة، تأليف: أوللي الجاردر (جامعة فلوريدا) – ترجمة: الدكتور أسامة إبراهيم الدسوقي والدكتور هاني محمد عسل، جامعة القاهرة. الدار الدولية للنشر والتوزيع، الطبعة الثانية 1993

4. أنواع خطوط النقل الكهربائية ،الدكتور علاء بيومي عبد العظيم.

5.الكيبلات الكهربائية، المهندس عادل عباس. اصدار المقاولون العرب، إدارة الاستشارات والتصميمات والخدمات الفنية للأعمال الكهروميكانيكية، 2012.القاهرة.

6.أنظمة القدرة الكهربائية – مكونات وتحليل، المهندس ياسر ناظم عبد الرحيم، دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع، وزارة الكهرباء العراقية 2009.

7. نظم القدرة – دراسة وتحليل، الدكتور سنان محمود والدكتور عبد الله محمد مهدي، جامعة الموصل، 1990.

8. القدرة الكهربائية ، محمد كاظم توفيق ، وزرة الكهرباء – بغداد ، 2017.

9. القدرة الكهربائية، الدكتور عبد الصاحب حسن مجيد، كلية الهندسة – جامعة بغداد، 1985.

10. المكائن الكهربائية، الدكتور محمد زكي محمد خضر والدكتور أحمد إبراهيم، جامعة الموصل -1979.

11. منظومات القدرة الكهربائية، الجزء الأول والثاني، ترجمة الدكتور محمد توفيق لازم الزهيري والدكتور فائق جواد محمد العزاوي- الكلية الفنية العسكرية العراقية – 1987.

12. هندسة الوقاية في الدوائر والنظم الكهربائية، الدكتور محمد محمد أحمد ، جامعة بور سعيد – 2007.

13. الموسوعة الكهربائية: الحماية الكهربية ، محمد خضير ، القاهرة ، 2014.

14.الوقاية في الشبكات الكهربائية ، كاميليا يوسف محمد ، الطبعة الثالثة ، القاهرة ، 2013.

15. حماية منظومات التوزيع الكهربائية ، آسر زكي ، عبد المنعم موسى ، مجلة الكهرباء العربية – العدد 51 ، جمهورية مصر العربية،1999.

16. تحليل هندسة القوى الكهربائية ، الدكتور محمود جيلاني ، هندسة القاهرة ، 2022.

17. نظم القدرة الكهربائية ، صالح سعيد بوحليقة ، محطة كهرباء الزويتينة - ليبيا ، 2022.

18. أسس التصميم الكهربائي، محمد صبحي المصري، دار النشر للتوزيع – دمشق.